

Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Dizaynında Kule Boyu, Çark Çapı ve Kanat Profili
Seçiminin Analizi ve Eskişehir İli İçin Bir Uygulama

Özgür Ömeroğlu

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan-2012

Analysis of Tower Height, Propeller Diameter and Wing Airfoil at Horizontal Axis
Wind Turbine Design and An Application for Eskişehir City

Özgür Ömeroğlu

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

April-2012

Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Dizaynında Kule Boyu, Çark Çapı ve Kanat Profili Seçiminin
Analizi ve Eskişehir İli İçin Bir Uygulama

Özgür Ömeroğlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliđi Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Enerji-Termodinamik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Yaşar PANCAR

Nisan 2012

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Özgür Ömeroğlu'nun YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Dizaynında Kule Boyu, Çark Çapı ve Kanat Profili Seçiminin Analizi ve Eskişehir İli İçin Bir Uygulama” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Yaşar PANCAR

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Yaşar PANCAR

Üye : Doç. Dr. Necati MAHİR

Üye : Yrd. Doç. Dr. İrfan ÜREYEN

Üye : Yrd. Doç. Dr. H. Sevil ERGÜR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mesut TEKKALMAZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Günümüzde elektrik enerjisi insan hayatını kolaylaştıran ve her geçen gün çeşidi artan elektrik enerjisi ile çalışan her türlü cihazın çalıştırılabilmesi maksadıyla vazgeçilemez bir kaynak haline gelmiştir. Elektrik enerjisinin yokluğu birçok alanda hayatı olumsuz etkileyebilmektedir. Dolayısıyla, artan elektrik enerjisi ihtiyacının çeşitli kaynaklar ile tam ve kesintisiz karşılanması hedeflenmektedir.

Gerek fosil kaynakların azalması, gerekse elektrik üretiminde alternatif yöntemlerin geliştirilmesi ihtiyacıyla birlikte de 1980’li yıllardan itibaren yenilenebilir, temiz, ucuz bir enerji olan, rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi konusunda yapılan çalışmalar önem kazanmış ve 2000’li yıllara gelindiğinde bu konuda oldukça büyük geliştirmeler gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilmeye devam etmektedir.

Hazırlanan tez çalışmasında da, bu çalışmalara paralel olarak “rüzgâr enerjisi” konusu “Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Dizaynında Kule Boyu, Çark Çapı ve Kanat Profili Seçiminin Analizi” özelinde bilimsel olarak ele alınmıştır. Çalışma dahilinde; rüzgâr enerjisinin genel prensipleri; rüzgâr türbinlerinin kule boyunun, çark çapının ve kanat profilinin türbinden elde edilecek güce etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonunda yapılan araştırmalar dahilinde, Eskişehir ilinde farklı boyutlarda kurulacak rüzgâr türbinleri ile elde edilebilecek güçlere yönelik hesaplamalar yapılmıştır. Özetle, bu tez kapsamında rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi esnasında rüzgâr türbininin boyutunun önemi anlatılmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr, rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları

SUMMARY

In contemporary age electrical energy is a source that humanity can hardly live without, since many equipment that make the human life easy with an ever increasing number need electricity to run. Lack of it may influence the life on many areas. So the naturally arising goal is to meet the demand for electrical energy continuously and satisfactorily from various sources.

Due to both decreasing of fossil fuels and necessity of developing alternative methods for electrical energy production starting from 1980's, producing electrical energy from wind power which is renewable, clean and cheap method gained importance and when 2000's have been reached great improvements have been achieved and is continuing to be achieved.

In this thesis, parallel to the mentioned researches the subject of "Wind Energy" has been studied scientifically in the specific topic of "Analysis of Tower Height, Propeller Diameter and Wing Airfoil at Horizontal Axis Wind Turbine Design". Within the study, the effect of tower height, propeller diameter and wing airfoil to the achieved energy power has been investigated through general principles of wind energy. In line with researches carried out, power parameters of different dimension wind turbines to be built around Eskişehir city have been calculated. In summary the importance of the dimensions of wind turbine has been explored within the scope of this thesis.

Keywords: Wind, wind energy, renewable energy sources

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince değerli fikir ve eleştirileri ile araştırmama katkıda bulunan, ilgi ve yönlendirmelerinin yanında her türlü olanağı sağlayan danışman hocam, Prof. Dr. Yaşar PANCAR'a; ayrıca bilgi ve deneyimleriyle bana yardımcı olan Seyid Fehmi DİLTEMİZ ve Hazar GÜMÜŞSOY'a, son olarak çalışmalarım esnasında her türlü desteğini esirgemeyen eşim Hülya ÖMEROĞLU ve beni motive eden oğlum Ali Eren ÖMEROĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
GİRİŞ	1
BÖLÜM 1:RÜZGÂR ENERJİSİ	2
1.1. Rüzgâr ve Enerji	2
1.1.1. Rüzgâr kaynakları	2
1.1.2. Ortalama rüzgâr hızı	6
1.1.3. Rüzgâr içerisindeki enerji	8
1.1.4. Türbülansın tanımı	9
1.2. Enerji Üretiminde Rüzgâr Kaynağının Üstünlükleri	9
1.3. Dünyada ve Ülkemizde Rüzgâr Enerjisi Kullanım Durumu	10
BÖLÜM 2 : RÜZGÂR TÜRBİNİ	13
2.1. Giriş	13
2.2. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	13
2.2.1. Dönme eksenine göre rüzgâr türbinleri	14
<u>2.2.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri</u>	14
<u>2.2.1.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri</u>	15
<u>2.2.1.3. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri</u>	17
2.2.2. Boyutlarına göre rüzgâr türbinleri	17
2.3. Rüzgâr Türbinlerinin Temel Elemanları	19
2.4. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Temel Elemanları	20

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.4.1. Kule.....	21
2.4.2. Çark.....	22
2.4.3. Gövde.....	24
2.4.4. Göbek.....	25
2.4.5. Düşük hız mili.....	26
2.4.6. Yüksek hız mili.....	26
2.4.7. Dişli kutusu.....	26
2.4.8. Frenler.....	27
<u>2.4.8.1. Aerodinamik frenler</u>	27
<u>2.4.8.2. Mekanik frenler</u>	28
2.4.9. Elektrik jeneratörü.....	28
2.4.10. Anemometre (rüzgâr ölçer) ve yelkovan.....	29
2.4.11. Yaw mekanizması.....	30
2.4.12. Hidrolik sistem.....	30
2.4.13. Soğutma ve filtreleme sistemi.....	30
2.4.14. Elektronik kontrol ünitesi.....	31
BÖLÜM 3 : KULE BOYUNUN SEÇİMİ.....	32
3.1. Giriş.....	32
3.2. Kule Boyunun Rüzgâr Türbininin Güç Üretimine Etkisi.....	32
3.2.1. Kule boyu ile rüzgâr hızının değişimi.....	32
3.2.2. Kule boyu ile yoğunluğun değişimi.....	34
<u>3.2.2.1. Atmosfer katmanları</u>	34
<u>3.2.2.2. Atmosfer içerisinde sıcaklığın yükseklik ile değişimi</u>	35
<u>3.2.2.3. Troposfer için yoğunluk hesabı</u>	36
3.3. Kule Boyu Seçiminde Çevre Etkisi.....	40
3.4. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Kule Tipleri ve Boyları.....	41
3.4.1. Kafes yapıli kuleler.....	42

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.4.2. Gergi halatlı kuleler	42
3.4.3. Tek direk kuleler	42
3.5. Kule Boyu Seçimi İle İlgili Yasal Düzenlemeler	42
BÖLÜM 4 : ÇARK ÇAPININ SEÇİMİ	44
4.1. Giriş	44
4.2. Çark Çapının Rüzgâr Türbininin Güç Üretimine Etkisi	44
4.3. Betz Limit	44
4.4. Çark Çapı Seçiminde Çevre Etkisi	49
4.5. Çark Çapına Bağlı Fonksiyon İle Maliyet Modellemesi	50
BÖLÜM 5 : KANAT PROFİLİNİN SEÇİMİ	53
5.1. Giriş	53
5.2. Kanat Aerodinamiği	53
5.2.1. Kanat profili aerodinamiği	54
5.2.2. Kanat profillerinin şekilleri	56
5.2.3. Kanat profili seçimi	57
5.3. Rüzgâr Türbininde Kullanılan Kanat Sayısı	60
5.4. Rüzgâr Türbininde Kanat Seçiminin Performansa Etkisi	60
BÖLÜM 6 : YATAY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNİ DİZAYNINDA KULE BOYU, ÇARK ÇAPI VE KANAT PROFİLİ SEÇİMİNİN ANALİZİNE ÖRNEK UYGULAMA	62
6.1. Giriş	62
6.2. Eskişehir İli Rüzgâr Özellikleri	62
6.3. Eskişehir İli Fiziki Özellikleri	65
6.4. Eskişehir İli İçin Hava Yoğunluğunun Hesaplanması	66
6.5. Kule Boyunun Rüzgâr Hızına Etkisi	67
6.6. Kanat Profili Seçimi	68
6.7. Kanat Sayısı Seçimi	68

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6.8. Çark Çapı Belirlenmesi.....	68
6.9. Elde Edilebilecek Güçler Hesabı	69
6.9.1. Kule boyu 30 m için farklı çark çaplarında hesaplar	69
6.9.2. Kule boyu 60 m için farklı çark çaplarında hesaplar	70
6.9.3. Kule boyu 90 m için farklı çark çaplarında hesaplar	70
6.9.4. Kule boyu 120 m için farklı çark çaplarında hesaplar	71
6.9.5. Kule boyu 150 m için farklı çark çaplarında hesaplar	72
6.10. Kapasite Faktörü Hesabı	73
SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	75
KAYNAKLAR DİZİNİ	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Yüzey etkisi ve boyun rüzgâr hızına etkisi.....	4
Şekil 1.2. Ortalama rüzgâr hızlarının Weibull olasılık dağılımı.....	6
Şekil 1.3. Rüzgâr hızına karşın güç yoğunluğu	8
Şekil 1.4. Dünyada toplam kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesi 1996-2010	10
Şekil 1.5. Avrupa’da çeşitli yöntemlere dayalı toplam kurulu güç durumu	11
Şekil 2.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin rüzgâr alma yönleri.....	15
Şekil 2.2. Düşey eksenli rüzgâr türbinlerine örnekler	16
Şekil 2.3. Rüzgâr türbinlerinin 1985-2003 yılları arasındaki boyutsal olarak değişimi	18
Şekil 2.4. Rüzgâr türbinlerinin ana elemanları	19
Şekil 2.5. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin elemanları	20
Şekil 2.6. Kule giriş kapısı ve kule içi güvenlik merdiveni.....	22
Şekil 2.7. Kalıplama yöntemiyle kompozit kanat üretimi	23
Şekil 2.8. Büyük rüzgâr türbinlerinde gövde bakımı.....	25
Şekil 3.1. Kule boyu ile rüzgâr hızının değişimi.	34
Şekil 3.2. Hidro/aero-statik taşıma	36
Şekil 3.3. Deniz seviyesinden itibaren yükseklikle yoğunluğun değişimi.	39
Şekil 3.4. Rüzgâr türbini çevresindeki ev veya ağaç engellerinin türbülans etkisi	40
Şekil 3.5. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kullanılan kule tipleri.....	41
Şekil 4.1. Disk modeli.....	45
Şekil 5.1. Kanat üzerine etkiyen temel kuvvetlerin gösterimi.....	54
Şekil 5.2. Kanat profili üzerinde kaldırma ve sürüklenme	55
Şekil 5.3. Farklı hücum açılarında kaldırma kuvvetinin değişimi.....	56
Şekil 5.4. Simetrik ve asimetric kanat profilleri.....	56
Şekil 5.5. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan bazı NACA kanat profilleri	58
Şekil 5.6. Yatay eksenli rüzgâr türbini için kanat seçiminin performansa etkisi.....	61
Şekil 6.1. Eskişehir 2003 yılı aylara göre ortalama rüzgâr hızları.....	63
Şekil 6.2. Eskişehir 2004 yılı aylara göre ortalama rüzgâr hızları.....	64
Şekil 6.3. Eskişehir 2005 yılı aylara göre ortalama rüzgâr hızları.....	64
Şekil 6.4. Eskişehir 2006 yılı aylara göre ortalama rüzgâr hızları.....	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1. Farklı yüzey çeşitleri için z_0 ve α değerleri.....	7
Çizelge 1.2. Türkiye'nin kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı.....	12
Çizelge 2.1. Çark çaplarına göre rüzgâr türbinleri.....	17
Çizelge 3.1. Çeşitli yüksekliklerde sıcaklık gradyanı.....	36
Çizelge 3.2. Deniz seviyesinden itibaren 200 m yüksekliğe yoğunluğun değişimi	38
Çizelge 4.1. 1,5 MW'lık 60 m çark çapına sahip rüzgâr türbininin bileşenlerini toplam makine maliyetine yüzde olarak oranı.....	51
Çizelge 5.1. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan bazı NACA profillerinin özellikleri	59
Çizelge 5.2. Kanat uç hız oranına göre kanat sayısının belirlenmesi	60
Çizelge 6.1. Eskişehir ilinin maksimum rüzgâr hızları ve yönleri.....	63
Çizelge 6.2. Kule boyu arttırılışlarına göre hesaplanan ortalama rüzgâr hızları	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
α	Arazi bağımlılığı parametresi
α	Hücum açısı
0	Derece
μ	Kütle ile değişen maliyetin oranı
η_T	Sistem verimi
η_m	Mekanik verim
λ	Sıcaklık gradyanı
λ	Kanat uç hız oranı
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
σ_v	Türbülans yoğunluğu
a	Eksenel indüksiyon faktörü
a	Çeşitli yüksekliklerde sıcaklık gradyanı
A	Alan (m^2)
C	Ölçek katsayısı
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
$C(x)$	Maliyet tasarım parametresi
C_D	Sürüklenme katsayısı
C_L	Kaldırma katsayısı
C_p	Güç katsayısı
C_T	Temel yapılandırma parametresi
D	Çap
D	Sürüklenme Kuvveti
E_k	Kinetik enerji
g	Yerçekimi ivmesi
f	Elektrik şebekesi frekansı (Hz)
h	Yükseklik
H	Çevre engellerin boyu
k	Şekil katsayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler

L	Kaldırma kuvveti
$m(x)$	Kütle tasarım parametresi
m_T	Temel yapılandırma parametresi
n	Dakikada devir sayısı
N	Çark gücü
$N_{efektif}$	Efektif güç
V	Tasarım rüzgâr hızı (m/s)
V_m	Ortalama rüzgâr hızı
p	Çift kutup sayısı
p	Basınç
R	Gaz sabiti (8.3145 J/(mol K))
S_v	Güç yoğunluğu
T	Sıcaklık
T	İtki
T_0	Deniz seviyesinde sıcaklık
T_p	Periyodik zaman aralığı
W	Ağırlık
z	Yerden olan yükseklik (m)
z_0	Pürüzlülük uzunluğu
z_{ref}	Referans yükseklik (genellikle 10 m)

Kısaltmalar

Açıklama

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
DERT	Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini
E	East (Doğu)
EWEA	Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği (The European Wind Energy Association, EWEA)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
GWEC	Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (Global Wind Energy Council, GWEC)
Hz	Hertz
ICAO	Uluslar Arası Sivil Havacılık Organizasyonu (International Civil Aviation Organisation, ICAO)
kN	Kilo Newton
kW	Kilowatt
km	Kilometre
ln	Doğal logaritma
NACA	Ulusal Havacılık Danışma Komitesi (National Advisory Committee for Aeronautics, NACA)
NE	North East (Kuzey doğu)
K	Kelvin
m	Metre
mm	Milimetre
n	Nano
MW	Megawatt
N	Newton
s	Saniye
SE	South East (Güney doğu)
SW	South West (Güney batı)
V	Volt
YERT	Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini
W	West (Batı)

GİRİŞ

Türkiye’de toplam ekonomik girdiler içerisinde; tarıma dayalı ekonomik girdilerin oranı gün geçtikçe düşerken; sanayi ve hizmet sektörüne dayalı ekonomik girdilerin oranı artmaktadır. Gerçekleşen bu büyüme eğilimi enerji ihtiyacının artmasına sebep olmaktadır.

Ülkemizde doğal enerji kaynağı rezervleri sınırlı olduğundan hammadde ithalatı enerji üretim maliyetlerini ve dışa bağımlılığı arttırdığından, alternatif enerji üretim yöntemleri önem kazanmaktadır.

Alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesine yönelik gerçekleştirilen çalışmalarda; sürekliliği, çevreciliği ve dışa bağımlı olmayışı sebebiyle rüzgâr enerjisi kullanılarak elektrik üretilmesi son yıllarda tüm dünyada artış göstermiştir. Dolayısıyla, Türkiye enerji planlamalarında da rüzgâr santrallerine yer verilmiştir.

Diğer taraftan, rüzgâr türbinleri kullanımının yaygınlaşması ve üretim maliyetlerinin düşmesi sebeplerinden ötürü gün geçtikçe üreticiler daha büyük ebatlarda rüzgâr türbinlerini geliştirerek kullanıma sunmaktadırlar. Böylelikle, aynı ölçülerdeki araziye kurulumu yapılan çiftlikten daha fazla güç elde edilmektedir.

Bir rüzgâr türbininden elde edilen güç, türbinin yapısal elemanları ile ilişkilendirildiğinde; rüzgâr türbini çarkının çapı, kulesinin boyu ve çarkında kullanılacak kanadın seçimi ile ilgili olduğu görülür. Bundan dolayı, rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesi sürecinde ortaya konulan yeni tasarımlarda çark çapının ve kule boyunun arttırıldığı görülmektedir.

Yatay eksenli rüzgâr türbini dizaynında kule boyu, çark çapı ve kanat profili seçiminin analizine yönelik yapılacak çalışmalar bu noktada önem kazanmaktadır.

BÖLÜM 1

RÜZGÂR ENERJİSİ

1.1. Rüzgâr ve Enerji:

Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi özdeş ısıtmamasından dolayı atmosfer içerisinde sıcaklık farklılıkları ve buna bağlı basınç farkları oluşmaktadır. Sonrasında atmosferik basınç farklarından kaynaklanan yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru olan, yatay yönlü hava hareketleri ise rüzgârları oluşturmaktadır (Karakaya, 2010).

Rüzgâr enerjisi, rüzgârı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket (kinetik) enerjisidir ve bu enerjinin bir bölümü yararlı olan mekanik veya elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir.

Rüzgâr enerjisi, diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi, insanlığın gelecekte büyük ölçekte kullanmayı tasarladığı, çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Temiz ve ekonomik olmasından dolayı yeni enerji kaynaklarının geliştirilmesi çalışmalarında öncelikli bir yeri vardır. (Devamlı mevcudiyeti mümkün olmamakla birlikte, yapılan hesaplar sonucunda rüzgâr enerjisi potansiyelinin hidroelektrik kaynaklara göre 15–20 kat daha fazla olduğu görülmüştür) (Karakaya, 2010).

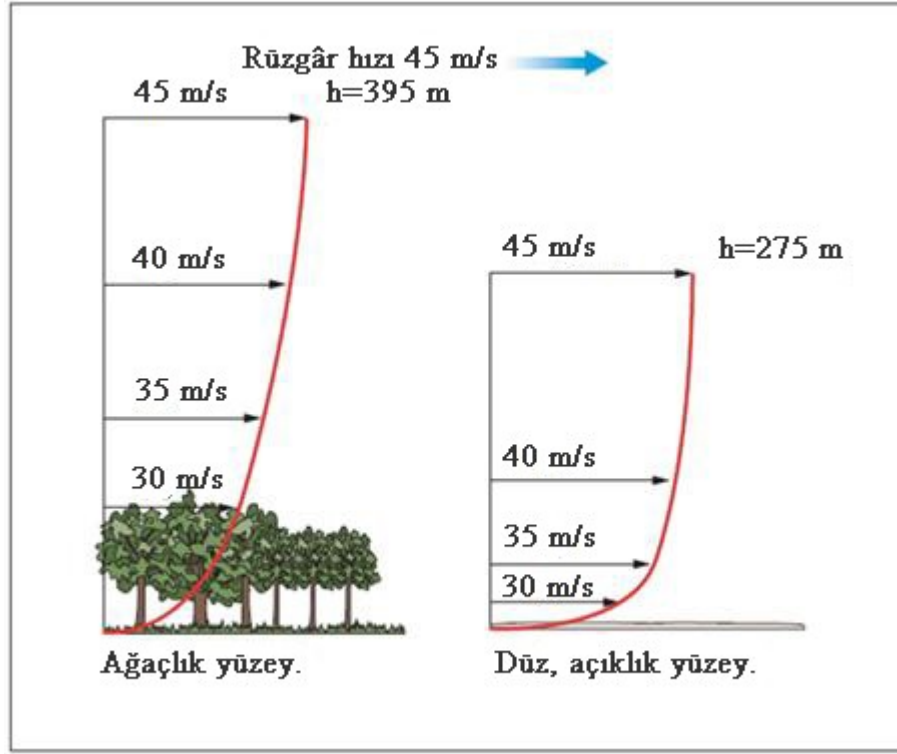
1.1.1. Rüzgâr kaynakları:

Makro-meteorolojik anlamda; rüzgârlar, atmosfer içerisindeki hava kütlelerinin esas olarak sıcaklık farklılıkları kaynaklı hareketleridir. Sıcaklık gradyanları düzensiz güneş ısıtmaları nedeniyle oluşur. Ekvatorial bölgeler kutuplara oranla daha fazla ısındığından daha sıcak ve hafif olan ekvatorial bölge havası, atmosferin dış katmanlarına doğru yükselir; alt katmalarda yerini kutup bölgelerinden gelen soğuk hava dönüş akımına bırakarak kutuplara doğru yönelir. Atmosfer içerisindeki hava

sirkülasyonu, dünyanın dönmesi ile ilişkili olan Coriolis kuvvetleri tarafından etkilenir. Bu kuvvet üst akışı doğuya doğru; alt akışı ise batıya doğru saptırır. Batı rüzgârlarının dünyanın dönüşüne bağlı olarak daha baskın olduğu 30⁰ Kuzey ve Güney enlemlerinden büyük enlemlerde diferansiyel ısıtma etkisi giderek azalmaktadır. Sonuç olarak; atmosferde gerçekleşen bu büyük ölçekli hava akımları geostrophic rüzgârları oluşturmaktadır (Bianchi, et al., 2007).

Tepelerin, vadilerin, akarsu vadilerinin, göllerin katılması ile karmaşık ve değişken rüzgâr rejimi oluşur. Küçük ölçeklerde ağaçlar ve binalar da bu karmaşıklığa ilave edilir (Karakaya, 2010). Atmosferin en alt tabakası yeryüzünden 100 m yüksekliğe kadar uzanır. Bu tabakada rüzgârlar sürtünme kuvvetleri ve engellerden dolayı gecikmelidir. Sürtünme kuvvetleri ve engeller rüzgârların hızı yanında doğrultusunu da değiştirir. Bu rüzgâr hızı değişimleri türbülanslı akışın ana nedeni olduğundan denizlerin ve büyük göllerin varlığı hava kütlelerinin sirkülasyonuna sebep olur. Buna yerel rüzgârlar ismi verilir (Bianchi, et al., 2007).

Rüzgâr karakteristikleri yükseklikle çok değişmektedir. Karaya yakın rüzgârlar oldukça türbülanslıdır. Rüzgâr yüksek binalar ve dağlar arasından geçerken ivmelenir. Rüzgâr binalar veya ağaçlar üzerinden veya çevresinden geçerken ise bu engellerden ötürü girdap formları türbülanslı akımlar oluşur. Bu türbülanslı akımlar kar yağışı esnasında kar tanelerinin karaya yaklaştıkça belirsiz ve karmaşık yollar izlemeleri esnasında kolaylıkla görülür. Türbülanslı hava akımları büyük bir kinetik enerji içerir. Bu enerji girdaplar veya küçük ölçekli kararsız hareketler içerisinde olduğundan türbülanslı hava akımlarının kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirmek çok zordur. (Tabak, 2009).



Şekil 1.1. Yüzey etkisi ve boyun rüzgâr hızına etkisi (Tabak, 2009).

Bunun yanında; yüzey pürüzlülüğü; yüzey üzerinde esen rüzgârın hızını etkiler. Ağaçlar ve binalar ile kaplı pürüzlü yüzeyler göl veya açık tarlalar gibi düzgün yüzeylere göre daha fazla sürtünme oluşturur. Sürtünme ne kadar büyükse yere yakın rüzgâr hızı o oranda düşüktür. Yerden yüzlerce metre yükseklikte düzgün kararlı hava akışları olduğundan, bu noktada rüzgârı elektrik enerjisine dönüştürmek çok daha kolay bir süreçtir. Yüksekliklerde rüzgâr engellenmemektedir ve daha az türbülanslı olduğundan kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirmek daha verimlidir. Bu ticari rüzgâr türbinlerinin neden o kadar büyük olduğunun bir işaretidir. (Tabak, 2009)

Bir tropikal ada üzerindeki rüzgârlar (ticaret rüzgâr) gündüz ve gece boyunca hemen hemen sabit bir rüzgâr akışı sağlayarak oldukça bağımlıdır. Ancak, dünyanın her bölgesinde ticaret rüzgârları yoktur ve hava sistemleri her bir kaç gün süresince hareket eder. Rüzgâr hızında, durgun bir havadan bir fırtınaya kadar çok farklı değişimler vardır. Elektrik enerjisi kullanımı zamana bağlı olduğu için rüzgârdaki günlük ve mevsimsel değişimler önemli bir göstergedir (Karakaya, 2010).

Tepeler, platolar ve uçurumlar bir rüzgâr türbini için yüksek rüzgâr hızı bulunabilecek yerlerdir. Daha alçak ve kapalı olan vadilerde rüzgâr hızı düşük olur. Bununla beraber, tüm vadilerde rüzgâr hızının düşük olması zorunlu değildir. Rüzgâr akışına paralel olduklarında vadiler kanal gibi davranabilir ve rüzgâr kaynağını artırabilir. Vadideki daralma havayı hunileyerek rüzgâr akışını daha da kuvvetlendirebilir. Yakınındaki tepe üstleri rüzgârlı olsa bile vadiler genellikle geceleri sakindir. Soğuk ve ağır hava tepelerden aşağıya doğru akar ve vadilerde toplanır. Bunun üzerindeki bir seviyede soğuk havanın sonuç katmanı genel rüzgâr akışından atılarak alçak arazilerde sakin durum oluşur. Böylece bir tepeye kurulan bir rüzgâr türbini, daha alçak seviyeli bir yere kurulan rüzgâr türbini çalışmazken, tüm gece boyunca güç üretebilir. (Karakaya, 2010)

Büyük su kütlelerine yakın kara alanları iki nedenden dolayı iyi rüzgârlı alanlar olabilir. İlk olarak, bir su yüzeyi bir kara yüzeyine göre çok daha düzgündür, bu nedenle su üzerinde akan hava daha az sürtünmeye tabidir. Hakim rüzgâr yönünün sahile doğru olduğu sahil şeridi en iyi rüzgâr alanıdır. İkinci, güneşli bir yaz gününde olduğu gibi, bölgesel rüzgâr hafif olduğu zaman, deniz veya göl meltemi olarak bilinen yerel rüzgârlar oluşur, çünkü kara ve deniz ısınmaları farklı oranlardadır. Karalar suya göre çok daha çabuk ısındığı için, kara üzerindeki ısınan ve yükselen havanın yerine su üzerindeki soğuk hava gelir. Bu şekilde denizden karaya 4 ile 6 m/s arasında veya üzeri hızında meltem oluşur. Geceleri kara çok daha çabuk soğuduğu için meltem durur veya ters yönde eser (Karakaya, 2010).

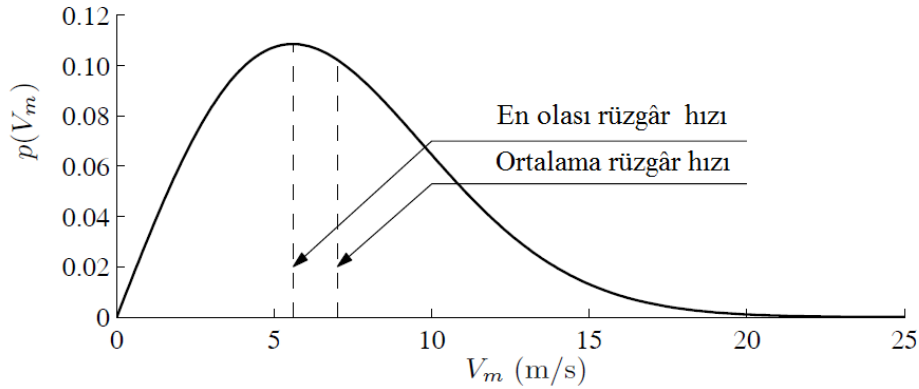
Dünya yüzeyine yakın bir sahada bahsi geçen bir rüzgâr; geostrophic ve yerel rüzgârların birleşimi sonucu oluşmuştur. Bu nedenle, coğrafi konuma, iklime, yer yüzeyi seviyesinden yüksekliğe, arazi pürüzlülüğüne ve çevrede bulunan engellere bağlıdır. Tüm bu rüzgârlar ise rüzgâr türbinleri ile etkileşim halindedir (Bianchi, et al., 2007).

1.1.2. Ortalama rüzgâr hızı:

Rüzgâr enerjisi potansiyeli olduğu umulan bir yerde yarı-kararlı ortalama rüzgâr hızı bilgisi rüzgâr enerjisi projesinin ekonomik uygulanabilirliğini belirlemek için çok önemlidir. Aynı zamanda bu veriler verimliliği ve dayanıklılığı en üst seviyede tutmak maksadıyla seçilecek olan rüzgâr enerjisi dönüştürme sisteminin seçiminde de fayda sağlamaktadır. Ortalama rüzgâr hızının olasılık dağılımı uzun yıllar boyunca toplanan ölçümlerden tahmin edilir. Tüm bu veriler genellikle bir histogram içerisinde düzenlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen rüzgâr dağılımına Şekil 1.2’de verilen Weibull dağılımı ile yaklaşım sağlanabilir. Weibull dağılımı;

$$p(V_m) = \frac{k}{C} \left(\frac{V_m}{C}\right)^{k-1} e^{-(V_m/C)^k} \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada k ve C sırasıyla şekil ve ölçek katsayılarıdır. Bu katsayılar belirli bir yerde rüzgâr verilerini karşılamak üzere ayarlanırlar (Bianchi, et al., 2007).



Şekil 1.2. Ortalama rüzgâr hızlarının Weibull olasılık dağılımı (Bianchi, et al., 2007).

Weibull olasılık fonksiyonu büyük ortalama rüzgâr hızlarının nadiren oluştuğunu buna karşın orta rüzgârların oluşma sıklığının daha fazla olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 1.2’deki özel durumda ortalama rüzgâr hızı 7 m/s olduğundan, en olası rüzgâr hızı 5,5 m/s’dir (Bianchi, et al., 2007).

Diğer taraftan, ortalama rüzgâr hızı boyun da fonksiyonudur. Engellerin olmaması halinde bile, yeryüzü sürtünme kuvvetleri oluşturarak alt tabakalardaki rüzgârların gecikmesine sebebiyet verir. Rüzgâr kayması olarak adlandırılan bu olgu yükseklik azaldıkça daha kayda değer bir şekilde kendisini hissettirir ve rüzgâr türbininin çalışması esnasında önemli etkileri vardır. Rüzgâr kaymasını tanımlamak için farklı matematiksel modeller öne sürülmüştür. Bunlardan birisi de Prandtl logaritmik yasasıdır;

$$\frac{V_{m(z)}}{V_{m(z_{ref})}} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_{ref}/z_0)} \quad (1.2)$$

z : Yerden olan yükseklik (m),

z_{ref} : Referans yükseklik (genellikle 10 m),

z_0 : Pürüzlülük uzunluğu (m).

Farklı arazi türleri için z_0 'ın tipik değerleri Çizelge 1.1'de yer almaktadır. Eğimli arazinin rüzgâr hızı gradyanı üzerindeki etkisini tanımlamak üzere;

$$V_m(z) = V_m(z_{ref}) \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1.3)$$

bağıntısı kullanılır. Burada α arazi bağımlılığı parametresidir (Bianchi, et al., 2007).

Çizelge 1.1. Farklı yüzey çeşitleri için z_0 ve α değerleri(Bianchi, et al., 2007).

Yüzey Çeşidi	z_0 (mm)	α
Kum	0,2-0,3	0,10
Biçilmiş Çim	1-10	0,13
Uzun Çim	40-100	0,19
Yerleşim Bölgesi	1000-2000	0,32

1.1.3. Rüzgâr içerisindeki enerji:

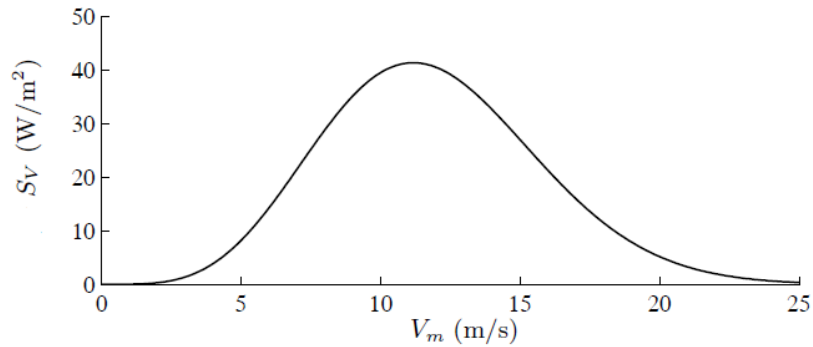
Birim hacimdeki bir akış içerisinde depolanan kinetik enerji $E_k = \frac{1}{2}\rho V^2$ 'dir. Burada ρ akışkanın yoğunluğudur. A olarak tanımlanan bir alana doğru akan bir akım için akış oranı AV 'dir. Dolayısıyla V hızıyla A alanından geçen bir rüzgâr içerisindeki güç;

$$N_V = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (1.4)$$

tür. Rüzgârdan elde edilebilecek enerji yukarıdaki denklemin T_p gibi bir zaman aralığında (bu aralık genellikle bir yıl alınır) integrali alınarak elde edilir (Bianchi, et al., 2007).

$$\text{Ortalama Enerji} = \frac{1}{2}\rho A \int_0^{T_p} V^3 dt \quad (1.5)$$

Buraya kadar elde edilen denklemler yardımıyla Weibull dağılımıyla rüzgâr hızı veya ortalama rüzgâr hızı alınarak ortalama enerji tahmin edilebilir. Hız ve güç arasında kübik bir ilişki verildiğinden rüzgâr hızının artmasıyla gücün rüzgâr hızına ne kadar bağımlı olduğu kolaylıkla tahmin edilebilir. Şekil.1.3 farklı rüzgâr hızlarındaki enerji dağılımındaki güç yoğunluğunu vermektedir (Bianchi, et al., 2007).



Şekil 1.3. Rüzgâr hızına karşı güç yoğunluğu (Bianchi, et al., 2007).

1.1.4. Türbülansın tanımı:

Ortalama rüzgâr hızında türbülans yoğunluğu aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\sigma_v \triangleq \frac{P_v}{V_m(z)} \cong \frac{1}{\ln(z/z_0)} \quad (1.6)$$

Burada;

σ_v : Türbülans yoğunluğu,

P_v : Türbülans güç oranı,

z_0 : Pürüzlülük uzunluğu.

z : Yerden olan yükseklik,

$V_m(z)$: Ortalama rüzgâr hızı

olarak tanımlanır. Eşitlikten açıkça görülmektedir ki; türbülans yoğunluğu yükseklik ile değişmektedir. Bunun yanında; çevrede engeller arttıkça türbülans yoğunluğunun da artacağı görülmektedir (Bianchi, et al., 2007).

1.2. Enerji Üretiminde Rüzgâr Kaynağının Üstünlükleri

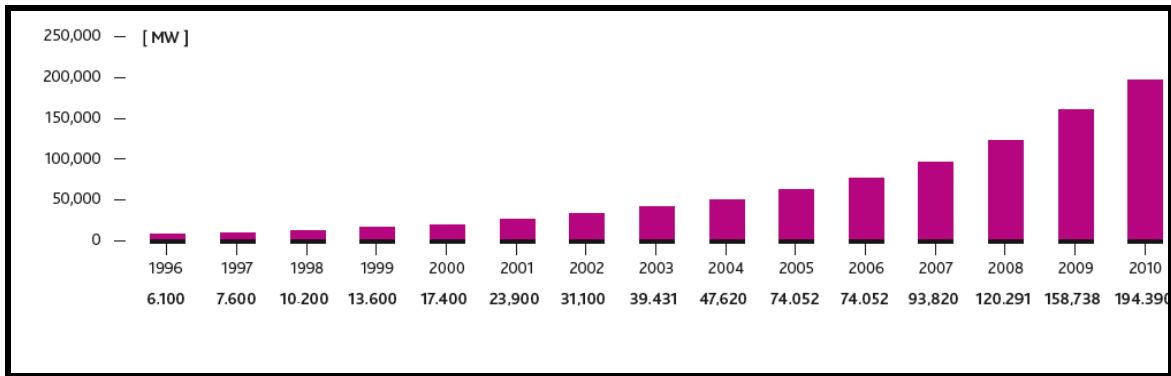
Enerji üretiminde rüzgâr kaynağının üstünlükleri aşağıdaki gibidir;

- Temizlik,
- Düşük maliyet,
- İklim değişikliği sorununa çözüm,
- Hava kirliliği sorununu azaltması,
- Enerji güvenliği,
- Enerji arzını çeşitlendirmesi,
- Petrol ithalini önleyebilir,
- Ulusal kaynaklar için devletlerarası anlaşmazlıkları önleyebilir,
- Kırsalda elektrik ağını geliştirebilir,

- İstihdam ve bölgesel kalkınma sağlayabilir,
- Fosil yakıtların fiyat değişkenliğindeki karmaşıklığı önleyebilir,
- Modülerdir ve çabuk kurulabilir,
- Karbon emisyon sorunu yoktur,
- Kaynak tükenmesi yok – küresel rüzgâr kaynağı küresel enerji talebinden daha büyüktür,
- Arazi dostu – Santrali içinde veya etrafında tarım/sanayi faaliyetleri yapılabilir,
- Uygulama esnekliği – Büyük ticari santraller/ev tipi uygulamalar mümkündür,
- Ulusal yarar – Geleneksel yakıtların aksine, enerji güvenliği açısından yakıt maliyetlerini ve uzun dönemli yakıt fiyatı risklerini eleyen ve ekonomik, politik ve temin etme riskleri açısından diğer ülkelere bağımlılığı ortadan kaldıran yerli ve her zaman kullanılabilir bir kaynaktır (<http://www.eie.gov.tr>, 2011).

1.3. Dünyada ve Ülkemizde Rüzgâr Enerjisi Kullanım Durumu

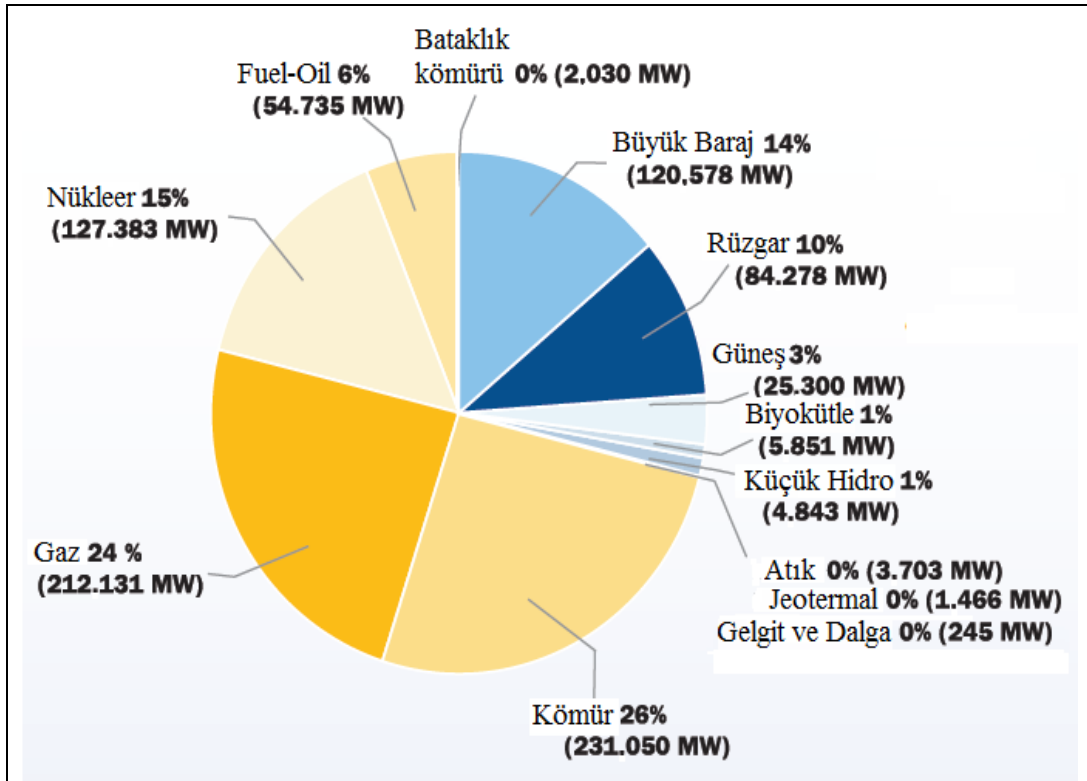
Son yıllarda tüm dünyada rüzgâr enerjisine dayalı elektrik üretimine yönelik yapılan yatırımlar oldukça artmıştır. Şekil 1.4'te 1996 yılından bu yana toplam kurulu kapasitenin 194.390 MW'a ulaştığı görülmektedir.



Şekil 1.4. Dünyada toplam kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesi 1996-2010 (Global Wind Energy Council, <http://www.gwec.net>,2011).

2010 yılı sonu itibariyle Avrupa’da çeşitli yöntemlere dayalı toplam kurulu güç durumu Şekil 1.4’te verilmektedir. Burada rüzgâr enerjisinin Avrupa’da kurulu tüm enerji elde etme yöntemleri içerisinde %10’luk bir payının olduğu görülmektedir. Bu rakam 2000 yılında yalnızca % 2’ydi. Dolayısıyla rüzgâr enerjisi, toplam kurulu güç kapasitesi içerisindeki payını Avrupa’da beş kat arttırmıştır (Global Wind Energy Council, <http://www.gwec.net>,2011).

Avrupa’da rüzgâr enerjisi kurulu güç kapasitesi 1995 yılından 2010 yılına kadar olan sürede ortalama %17,6 yıllık artış oranıyla doğrusal olarak artmıştır. 2010 yılı sonu itibariyle Avrupa’da rüzgâr enerjisine dayalı toplam kurulu güç kapasitesi Avrupa Birliği ülkelerinde 84.278 MW ve birlik dışındaki Avrupa ülkelerinde ise 1901 MW (Türkiye 1329 MW) olarak gerçekleşmiştir (The European Wind Energy Association, <http://www.ewea.org>, 2011).



Şekil 1.5. Avrupa’da çeşitli yöntemlere dayalı toplam kurulu güç durumu (The European Wind Energy Association, <http://www.ewea.org>, 2011).

Ülkemizde Mart 2011 tarihinden itibaren, kurulu toplam 41 santralde kapasite 1.414 MW'tır. Dokuz santralde ise 750 MW'lık kurulum çalışmaları devam etmektedir (Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği, <http://www.ruzgarenerjisibirliigi.org.tr>, 2011).

Türkiye'nin 2009 yılı sonundaki kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı Çizelge 1.2'ye göre; rüzgâr enerjisinin tüm kaynaklar içerisindeki payı %2'dir (Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği, <http://www.ruzgarenerjisibirliigi.org.tr>, 2011).

Çizelge 1.2. Türkiye'nin kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı (Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği, www.ruzgarenerjisibirliigi.org.tr, 2011).

Kaynak	Kurulu Güç (MW)
Doğalgaz	12.734,8
Kömür	10.196,8
Jeotermal	84,7
LPG	2.480
Rüzgâr	1.100
Hidrolik	15.061
Diğerleri	1.965,7
Toplam	43.623

BÖLÜM 2

RÜZGÂR TÜRBİNİ

2.1. Giriş:

Rüzgâr türbinleri rüzgârın gücüyle bir elektrik jeneratörünü çevirerek elektrik üreten makinelerdir (Anaya-Lara, et.al.,2009). Bir rüzgâr türbininin temel çalışma prensibi basit olmasına rağmen, çeşitli alanlarda bilginin bir arada kullanımını gerektirdiğinden karmaşık bir sistemdir. Rüzgâr türbini tasarımı esnasında aerodinamik, mekanik, yapısal, kontrol ve elektrik bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla tasarım aşamasında farklı disiplinlerin birbirleriyle etkileşimli çalışmaları gerekmektedir (Slootweg, 2003).

Dünyada rüzgâr enerjisinden elektrik üreten ilk türbin, 1891'de modern aerodinamiğin önemli mühendisi olan Paul la Cour tarafından Danimarka'da inşa edilmiştir (http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf, 2011).

2.2. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması:

Rüzgâr türbinleri üzerinde her geçen gün yapılan geliştirme ve tasarım çalışmalarının bir sonucu olarak; farklı rüzgâr türbini tipleri ortaya çıkmış ve bunun yanında ihtiyaca göre farklı boyutta rüzgâr türbinleri üretilmiştir. Dolayısıyla rüzgâr türbinlerinden bahsederken rüzgâr türbini çeşitliliğinin çok olmasından ötürü rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılması ihtiyacı doğmuştur. Rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine ve boyutlarına göre olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmıştır.

2.2.1. Dönme eksenine göre rüzgâr türbinleri:

Rüzgâr türbinleri dönme eksenine göre üçe ayrılırlar;

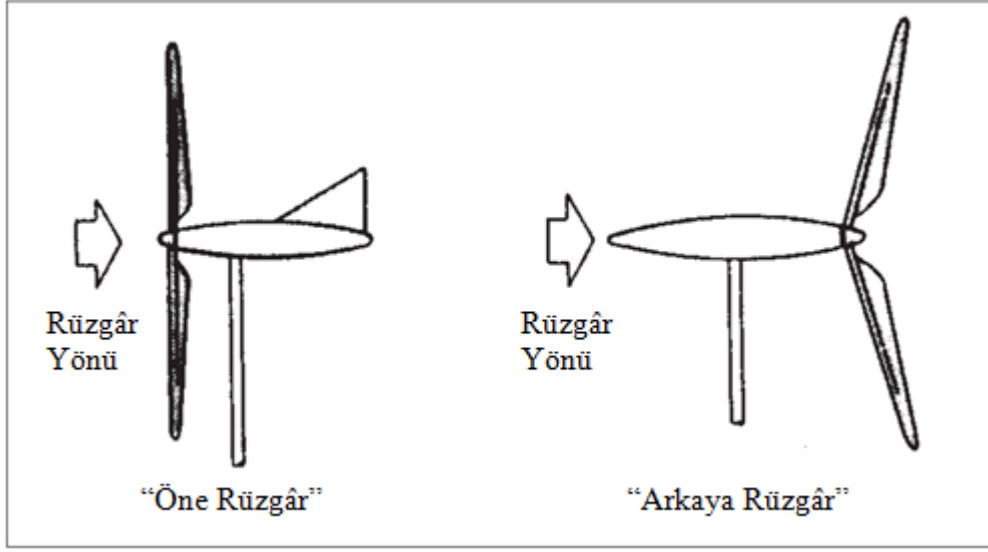
- Yatay eksenli rüzgâr türbinleri,
- Dikey eksenli rüzgâr türbinleri,
- Eğik eksenli rüzgâr türbinleri.

2.2.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri:

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri dönme eksenini rüzgâr yönüne paralel ve kanatları rüzgâr yönüne dik olan türbinlerdir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık % 45'dir (http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf, 2011).

Rüzgârın yönüne dönme hareketi iki ayrı konstrüksiyonla sağlanır. Bunlar “öne-rüzgâr” ve “arkaya-rüzgâr” olarak adlandırılır. Eğer kanat, rüzgârı ön yüzünden alıyorsa rotorun arkasına bir kılavuz kanat takılır. Diğer durumda ise kanat rüzgârı arka kısımdan alır veya kanatlar biraz konik yapılıdır. Böylece sistem rüzgârı takip ederek maksimum fayda sağlanır. Şekil 2.1'de “öne-rüzgâr” ve “arkaya-rüzgâr” olarak adlandırılan yatay eksenli rüzgâr türbinleri gösterilmiştir (Doty and Turner, 2007).

Önden rüzgâr alan türbinlerin en önemli üstünlüğü kulenin arkasında olacak rüzgâr gölgeleme etkisine çok az maruz kalmasıdır, yani rüzgâr kuleye eğilerek varır. Kule yuvarlak veya düz olsa bile kanadın kuleden her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz azalır. Bu nedenle rüzgâr çekilmesinden dolayı kanatların sert yapılması ve kuleden biraz uzakta yerleştirilmeleri gerekir. Ayrıca önden rüzgâr alan türbinler, rotoru rüzgâra karşı döndürmek için yaw mekanizmasına gereksinim duyarlar (http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf, 2011).

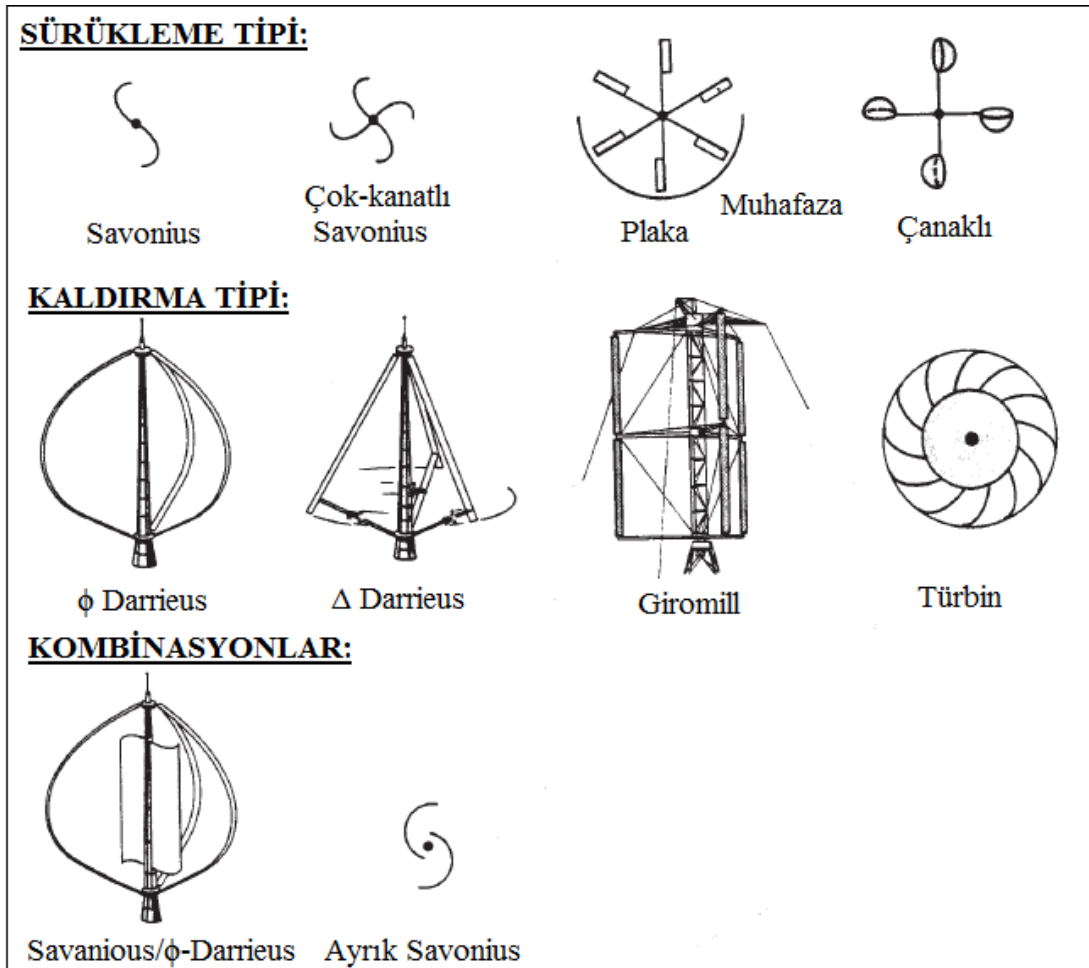


Şekil 2.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin rüzgâr alma yönleri (Doty and Turner, 2007).

Rüzgârı arkadan alan türbinlerde; çark kule arkasına konulur. Bunların önemli üstünlüğü rüzgâra karşı dönmek için yaw mekanizmasına gereksinim duymayışlarıdır. Eğer muhafaza ve çark uygun tasarlanırsa, muhafaza rüzgârı pasif olarak izler. Daha önemli bir üstünlük kanatların esnek özelliğe sahip olmasıdır. Bu hem ağırlık hem de makinenin güç dinamiği açısından önemli bir üstünlüktür. Böylelikle, önden rüzgârlı türbinlere göre daha hafif yapılmalarından dolayı kule yükü azalacaktır. Ancak; kanat kuleden geçerken meydana gelen güç dalgalanması, türbine önden rüzgâr alan türbinlere oranla daha çok zarar verir (http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf, 2011).

2.2.1.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri:

Dönme eksenleri rüzgâr yönüne dik olan bu türbinlerin kanatları düşey eksendedir.



Şekil 2.2. Düşey eksenli rüzgâr türbinlerine örnekler (Doty and Turner, 2007).

Düşey eksenli rüzgâr türbini rüzgârı her yönden kabul edebilme üstünlüğüne sahiptir. Bu türbinler rüzgârı sürükler veya kaldırır. İlk harekete geçişleri güvenli değildir ve verimleri yaklaşık % 35'dir. Düşük rüzgâr hızları ve az miktarda su pompalamak için tasarlanmışlardır. Kanat sayısının artması malzeme ağırlığını da beraberinde getirdiğinden, yüksek rüzgâr hızlarında verimsiz çalışır. Rotor çapı 5 m. olan türbinden yaklaşık 0,5 kW güç elde edilir. Bu türbinleri yer yüzeyine bağlayabilmek için çelik halatlara gereksinim duyulmaktadır (http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf, 2011). Düşey eksenli rüzgâr türbini tiplerine örnekler Şekil 2.2'de verilmiştir (Doty and Turner, 2007).

2.2.1.3. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri:

Dönme eksenleri düşey ile rüzgâr yönünde bir açı yapan rüzgâr türbinleridir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenini arasında belirli bir açı bulunmaktadır. Eğik eksenli rüzgâr türbinlerinin geniş bir uygulama alanı yoktur (Karakaya, 2010)

2.2.2. Boyutlarına göre rüzgâr türbinleri:

Rüzgâr türbinleri çark çaplarına ve/veya güçlerine göre küçük, orta ve büyük olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadırlar. Rüzgâr türbinlerinin boyutsal olarak sınıflandırılması rakamsal olarak aşağıdaki Çizelge 2.1’de verildiği gibi ifade edilmektedir (Spera, 2009).

Çizelge 2.1. Çark çaplarına göre rüzgâr türbinleri (Spera, 2009).

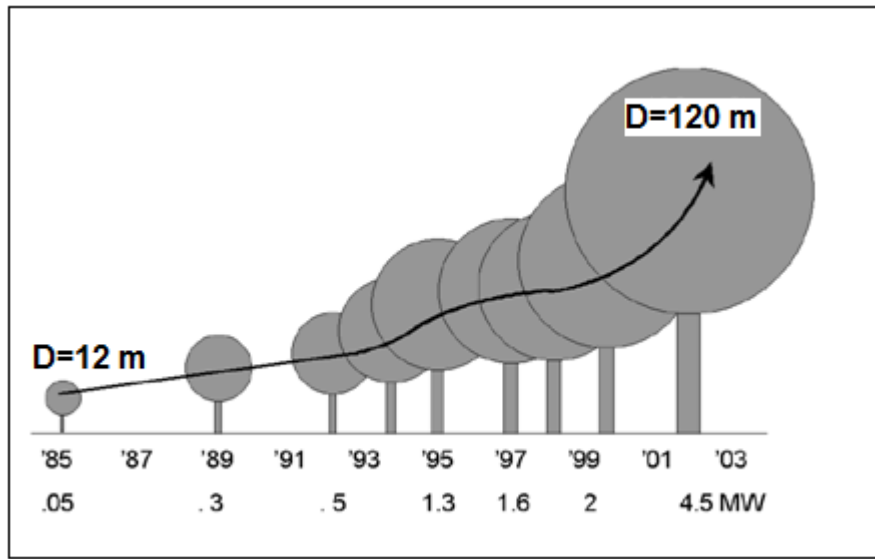
Boyut	Çark Çapı	Güç
Küçük	12 m’den az	40 kW’dan az
Orta	12-45 m	40-999 kW
Büyük	46 m’den büyük	1 MW ve daha büyük

Rüzgâr türbinlerinin 1985-2003 yılları arasındaki boyutsal olarak gelişimi ve elde edilen güç oranlarına ilişkin veriler Şekil 2.3’de olduğu gibidir. Şekilden görüldüğü üzere boyut ve güç oranları artan bir oranla gerçekleşmiştir (Slootweg, 2003).

1970-1980 yılları arasında güç üretimi maksadıyla geliştirilen ilk rüzgâr türbinlerinin güç üretim kapasitesi 30-60 kW civarındaydı. Bu ölçüdeki rüzgâr

türbinlerinin yüzlercesi kullanılarak Amerika Birleşik Devletleri'nin California eyaletinde büyük rüzgâr çiftlikleri kurulmuştur (Breeze, 2009).

2000'li yıllarda rüzgâr türbini üreticileri çok megawatt'lı rüzgâr türbini alternatiflerini sunmaya başlamışlardır. 2004 yılı başlangıcında 2 MW en sık olmakla birlikte 5 MW'a kadar büyük kapasitede rüzgâr türbinleri de geliştirilmiştir. Bu büyük türbinlerin çark çapları 120 m'ye kadar ulaşmaktadır (Breeze, 2009).



Şekil 2.3. Rüzgâr türbinlerinin 1985-2003 yılları arasındaki boyutsal olarak değişimi (Slootweg, 2003).

Daha büyük rüzgâr türbinleri üretimine yönelimin sebebi olarak aşağıdaki dört etken verilebilir.

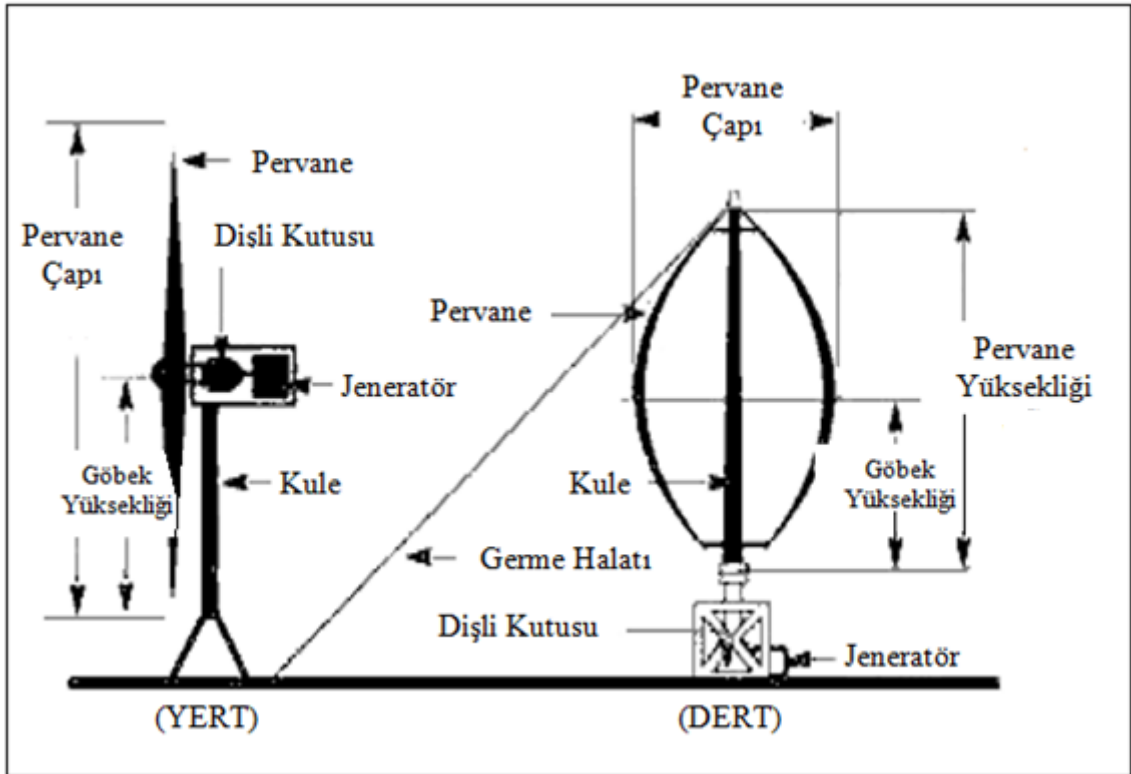
- Genel olarak; rüzgâr türbininin boyutunun artmasıyla üretilen kW başına oranlanan rüzgâr türbini maliyeti düşer,
- Üretilen kW başına oranlanan istasyon ayarlama (arazi ve altyapı) maliyetleri rüzgâr türbini boyutu arttıkça azalır (örneğin kablolama ve ihtiyaç duyulan arazi),
- İyi rüzgâr sitelerinin birçoğu dağ sırtlarına büyük rüzgâr türbinleri kullanılarak arazi birim başına daha fazla enerji üretimini sağlayacak şekilde

kurulmuştur; çünkü dağ sırtlarında genellikle sadece bir sıra rüzgâr türbinleri kurulabilecek kadar yeterli alan bulunmaktadır,

- İşletme ve bakım maliyetlerinin bir kısmı kurulacak türbin sayısı ile birlikte artmaktadır; bunun yanında da istenilen rüzgâr gücü kapasitesine göre türbin boyutunun büyütülmesiyle de aynı maliyetler düşürülebilmektedir (Spera, 2009).

Büyük bir olasılıkla bu yüzyılın ilk çeyreğinin sonunda deniz kıyılarındaki uygulamalar için geliştirilmiş 6-10 MW kapasiteli rüzgâr türbinleri geliştirilerek üretilmiş olacaktır. Tüm bu gelişmelerin yanında; rüzgâr türbini tasarımında boyutsal olarak bir üst limitin olup olmadığı halen bilinmemektedir (Breeze, 2009).

2.3. Rüzgâr Türbinlerinin Temel Elemanları:

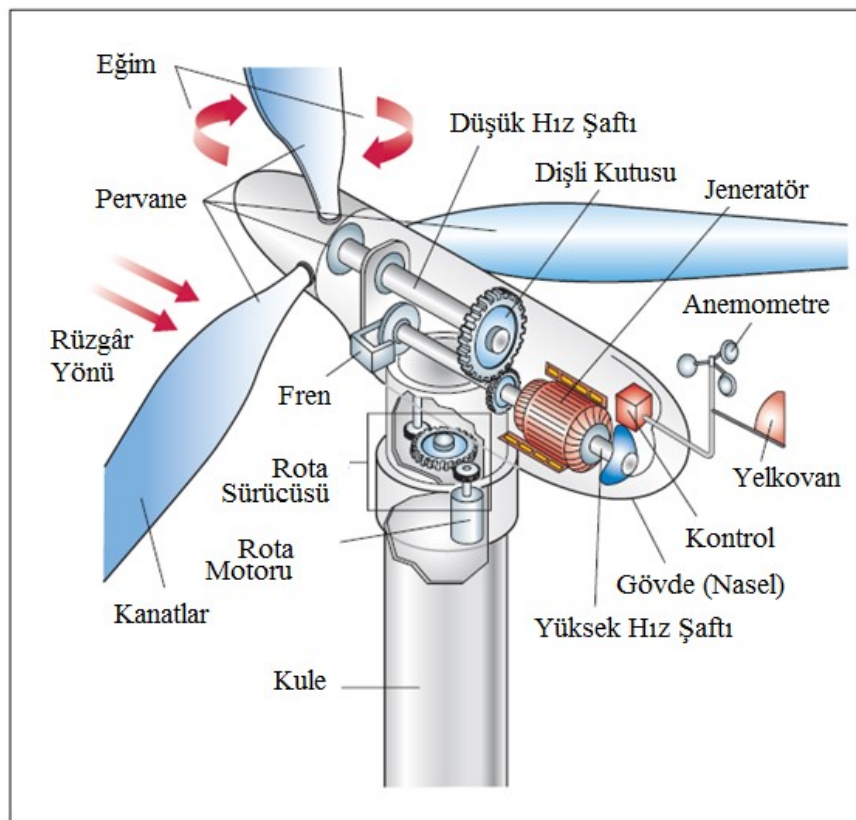


Şekil 2.4. Rüzgâr türbinlerinin ana elemanları (Al-Shemmeri, 2010).

Rüzgâr türbinlerinde, rüzgârın gücüyle dönen kanatlar muhafaza içerisinde dişli kutusuyla bağlantılı bir şaftı çevirir. Dişli kutusu jeneratöre uygun olacak şekilde dönme hızını artırır ve jeneratörde oluşan manyetik alanlar, dönme enerjisini elektrik enerjisine çevirir (Anaya-Lara, et.al.,2009). Rüzgâr türbinleri genellikle Şekil 2.4'te verildiği gibi altı ana elemandan oluşur; bunlar: çark, dişli kutusu, jeneratör, kontrol/koruma sistemi, kule ve kule temelidir (Al-Shemmeri, 2010).

2.4. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Temel Elemanları:

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, çevredeki engellerin rüzgârı kesmeyeceği yükseklikte bir kule, kule üst kısmına yerleştirilmiş bir gövde ve gövdeye bağlantısı yapılmış çarkın bir araya gelmesiyle oluşmaktadır (Demir, 2007).



Şekil 2.5. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin elemanları (Tabak, 2009).

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri genel olarak Şekil 2.5’de verildiği üzere aşağıdaki elemanlardan oluşmuştur;

1. Kule,
2. Çark kanat (Rotor),
3. Gövde (Nasel),
4. Göbek (Kanatların çark’a bağlantısını sağlayan parça)
5. Düşük hız şaftı,
6. Dişli Kutusu,
7. Yüksek hız şaftı,
8. Mekanik fren,
9. Elektrik jeneratörü,
10. Elektrik kontrol sistemi,
11. Hidrolik sistem (Günday ve Küçükseller, 2008).

2.4.1. Kule:

Bütün elemanların üzerinde bulunduğu, elektrik kablolarının içinde yer aldığı taşıyıcı elemandır (http://sinirsizenerji.net/Ruzgar_turbini.aspx, 2011). Kuleler genellikle tüp şeklinde çelik, kafes yapılı veya betonarme olarak inşa edilir. Halat destekli, direk tipi kuleler genellikle küçük türbinlerin imalatında kullanılır (Demir, 2007). Modern rüzgâr türbinleri, halka enine kesitli tüp şeklinde kuleler kullanılarak inşa edilirler (Güneş, 2006).



Şekil 2.6. Kule giriş kapısı ve kule içi güvenlik merdiveni (1. <http://www.freshford-somerset.co.uk/cutenews/data/upimages/windturbinedoorway.jpg>, 2011 ; 2. <http://www.gravitec.com/training/fall-protection-rescue-training/wind-turbine-climber-rescue-competent-trainer-refresher.html>, 2011)

Tüp şeklindeki kule en çok tercih edilen kule tipidir. Genellikle 20-30 metre yükseklikte üretilirler (Demir, 2007). Bu tipteki kulelerin, giriş kapısı ve kule içi güvenlik merdiveni ve/veya asansörü mevcuttur (Giovanello and Kaplan, 2008). Şekil 2.6’da kule giriş kapısı ve kule içi güvenlik merdiveni gösterilmektedir. Kafes yapılı kuleler çelik profillerin kaynaklanarak birleştirilmesi ile oluşturulur (Demir, 2007).

2.4.2. Çark:

Kanatların üzerinden hareket eden rüzgâr akışının etkisi ile dönerek kinetik enerjiyi mekanik enerjiye çeviren rüzgâr türbini elemanıdır. Diğer bir deyişle rüzgârın gücünü çark göbeğine aktaran elemandır (Demir, 2007; http://sinirsizenerji.net/Ruzgar_turbini.aspx, 2011).

Çark kanatları yapımında cam lifli güçlendirilmiş plastik, karbon lifli güçlendirilmiş plastik, ahşap, alüminyum veya çelik malzemeler tercih edilmektedir.

Küçük rüzgâr türbinlerinin tasarım aşamasında ağırlık veya sertliğe göre malzeme seçiminden çok üretim verimliliği ön plana çıkmaktadır. Büyük ölçekli türbinlerde ise kanat profiline uygun malzeme seçimi oldukça önemlidir (Demir, 2007).



Şekil 2.7. Kalıplama yöntemiyle kompozit kanat üretimi (http://www.eng.cam.ac.uk/news/stories/2007/bamboo_wind_turbines, 2011).

Büyük rüzgâr türbinlerinin çoğunda cam lifli güçlendirilmiş plastik kullanılmaktadır. Bu malzemenin, hafiflik ve yüksek dayanıklılık sağlamasının yanında diğer malzemelere göre maliyeti daha ucuzdur. Karbon lifli güçlendirilmiş plastik yapımı kanatlar prototiplerde başarı sağlamış ve sınırlı bir üretim yapılmıştır; ancak bu malzemenin cam lifli güçlendirilmiş plastikten daha yüksek dayanım sağlaması ve hafifliği bir avantaj olmasına rağmen; çok pahalı olması ekonomik açıdan kullanımını sınırlamıştır (Demir, 2007).

Cam elyafının kopma mukavemeti, 420 N/m^2 ile St 52 çeliğinin kopma mukavemeti 520 N/m^2 'ye yakındır. Karbon epoksi ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin mukavemeti ise, 550 N/m^2 ile çelikten daha iyidir (Şipar, 2011).

Cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin ana sorunu elastisite modülünün 15 kN/nm^2 ile çeliğe nazaran (210 kN/nm^2) çok düşük olmasıdır. Bu nedenle çok uzun kanatlarda cam elyaf yerine, elastisite modülü 44 kN/nm^2 olan karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzeme kullanılır (Şipar, 2011).

Diğer taraftan, ahşap rüzgâr türbini kanat imalatında çok uzun zamanlardır tercih edilen bir malzeme seçeneğidir. Ahşap malzemeler, ucuz, kolay temin edilebilir ve hafif olmalarına karşın, neme karşı hassas olmaları ve işlem maliyetlerinin yüksek olması gibi dezavantajlara sahiptirler. Bu dezavantajın giderilmesine yönelik olarak; “Soğuk Kalıp” olarak adlandırılan bir teknik geliştirilmiştir. Bu yöntemde; ahşap kaplama tahtaları bir vakum torbasında epoksi reçine ile haddelenerek, kanat kalıbı şeklinde preslenir. Böylelikle, elde edilen kanatlar, özellikle büyük rüzgâr türbinlerinde dayanıklılık ve hafiflik bakımından diğerlerine göre oldukça büyük bir üstünlük sağlamaktadırlar. Bu konudaki geliştirme çalışmaları devam etmektedir (Demir, 2007). Şekil 2.7’de kalıplama yöntemiyle kompozit kanat üretimi görülmektedir.

Çelik kullanılarak üretilen kanatların eğilme kuvvetlerine karşı mukavemeti çok iyidir; ancak yorulma mukavemetleri düşük ve korozyon dayanımları düşük olduğundan uygulama esnasında problemler yaşanmaktadır. Alüminyum kullanılarak imal edilen kanatlar ise çelik kanatlara göre daha hafif, yorulma mukavemetleri daha yüksek ve korozyona karşı daha dayanıklı olmalarına karşın; kabuk şeklindeki malzemenin burkulması, imalat yönteminin zorluğu ve buna bağlı olarak maliyetin artması alüminyum malzemenin dezavantajıdır (Güneş, 2006). Dolayısıyla, çelik ve alüminyum alaşımları ağırlık ve metal yorgunluğu gibi problemler göz önünü alınarak; sadece küçük güçlü türbinlerin kanatlarının imalatında kullanılmaktadır (Demir, 2007).

2.4.3. Gövde:

Gövde (Nasel); rüzgâr türbininin elemanlarını dış ortamdan korur (http://sinirsizenerji.net/Ruzgar_turbini.aspx, 2011). Rüzgâr türbininin dişli kutusu ve elektrik jeneratörü dâhil kilit parçalarını içerir. Gövde içerisinde bakım yapılması gerektiğinde

bakım personeli gövde muhafazası içerisinde türbin kulesinden girebilir (Demir, 2007). Şekil 2.8’de görüldüğü üzere bakım elemanı gövde içerisinde kolaylıkla çalışabilmektedir.



Şekil 2.8. Büyük rüzgâr türbinlerinde gövde bakımı (http://www.siemens.com/press/en/presspicture/?press=/en/presspicture/2009/renewable_energy/ere20080806-02.htm, 2011).

2.4.4. Göbek:

Kanatların gövde ile olan bağlantı noktalarını oluşturur. Bu noktalar bazı türbinlerde verimliliği arttırabilmek için servo kontrollü hareketli parçalardan oluşur. Bu sayede kanatlar açılabilir olarak kontrol edilerek, rüzgârın hızına göre uygun değerdeki açıda kontrol sağlanır (Şipar, 2011).

Göbek küresel grafitli dökme demir malzemedendir yapılıdır. Şeklinin karmaşık, büyük ve yekpare olmasından dolayı göbek imalatında bu malzemenin kullanımı

zorunlu hale gelmektedir. Ayrıca göbeğin metal yorulmasına karşı da oldukça dirençli olması gereklidir. Küresel grafitli dökme demir kullanımı ile normale göre kırılmaya karşı dayanıklılık arttırılmaktadır (Karakaya, 2010).

2.4.5. Düşük hız mili:

Çark göbeğini dişli kutusuna bağlar. Bu mil aerodinamik frenlerin çalışması için hidrolik sisteme ait borular içerir (Demir, 2007).

2.4.6. Yüksek hız mili:

Dişli kutusundan gelen hareketi elektrik jeneratörüne iletir. Acil durumlar için mekanik disk freni ile birlikte çalışmaktadır; böylelikle ani ve aşırı yüklerde sistemin zarar görmesini engeller (http://sinirsizenerji.net/Ruzgar_turbini.aspx, 2011; Şipar, 2011).

2.4.7. Dişli kutusu:

Çarktan gelen devir hareketi belirli bir oranda hızlandırılarak gövde üzerinde bulunan dişli kutusuna aktarılır (http://sinirsizenerji.net/Ruzgar_turbini.aspx, 2011). Rüzgâr türbininin en ağır parçasıdır (Şipar, 2011).

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan dişlilerin oranı sabittir. Genellikle, 600 kW ve 750 kW gücünde bir rüzgâr türbininin dişli oranı 1:50; 1,5 MW gücündeki bir rüzgâr türbininin dişli oranı 1:98 ve 3MW gücündeki rüzgâr türbinlerinin dişli oranı ise 1:108 seviyelerindedir (Karakaya, 2010).

İhtiyaç duyulan elektriksel frekans değerini üretmede, çark açısal hızı genellikle jeneratörü döndürmek için yeterince hızlı değildir. Dönme sistemleri için gerekli

hızlarda mekanik olarak bir artış ve azalış dişli takımları ile sağlanabilir. Rüzgâr türbinlerinde dişli takımları düşük hızlı milin açısız hızını jeneratöre bağlanan yüksek hızlı milin hızına yükseltmede kullanılırlar (Güneş, 2006).

2.4.8. Frenler:

Rüzgâr türbinlerinin gerektiğinde güvenli bir şekilde durdurulmasını sağlamak amacıyla; türbin mekanizması üzerinde aerodinamik ve mekanik olmak üzere iki tip fren bulunmaktadır.

2.4.8.1. Aerodinamik frenler:

Kanat geometrisinin konumunun değiştirilerek kanat üzerindeki akışkanın hareketinin bozulması veya engellenmesi sonucu dönme hareketini sağlayacak kuvvetlerin sönümlemesi için kullanılırlar. Stall kontrollü rüzgâr türbinlerinde kanat ucunun 90^0 , hatve kontrollü ve aktif stall kontrollü türbinlerde kanadın kendi yatay eksenini etrafında 90^0 dönmesiyle frenleme sağlanır. Elektriklerin kesilmesi durumunda bu sistem yaylar yardımıyla çalıştığından frenleme sağlanabilmektedir. Frenleme sonrası tam durma birkaç tur dönüş sonrası gerçekleştiğinden ve ani bir durma olmadığından bu esnada kule üzerinde oluşan gerilme düşüktür (http://sinirsizenerji.net/Ruzgar_turbini.aspx, 2011).

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan kanat çapına göre kanat ucu dönen kısmı 3-7 m uzunluğunda olabilmektedir. Dönen kısım karbon fiberden imal edilmiş şaft üzerine monte edilmiştir. Rüzgâr türbinlerinde aerodinamik fren sisteminin yanında hidrolik disk fren sistemi de bulunmaktadır (Karakaya, 2010).

2.4.8.2. Mekanik frenler:

Rotoru gerektiğinde tamamen durdurmak için yüksek hız şaftına yerleştirilmişlerdir. Rüzgâr hızına bağlı olarak; özellikle yüksek hızlarda rüzgâr türbinlerinin güvenli bir şekilde çalışması için etkili bir fren sistemi gereklidir. Öyle ki; hız limitinin aşıldığı durumlarda şebeke bağlantısının koparılarak çarkın güvenli olarak durdurulmasını sağlarlar (Demir, 2007). Ayrıca bakım çalışmaları esnasında güvenlik gerekçesiyle mekanik frenler yardımıyla çarkın durdurulması uygun olacaktır.

Mekanik frenler hidrolik sistem içermektedirler; bu yüzden sistem içerisindeki hidrolik seviyesinin azalmamasına dikkat edilmelidir. Fren bloğu ve disk arasında sürtünme oluşturularak frenleme sağlanır. Frenleme esnasında oluşan gerilme miktarı yüksek olduğundan, fren bloğunun tasarımında özel alaşımlar tercih edilir. Arabalarda kullanılan fren sistemleri azami 300 °C'ye kadar çalışabilmekteyken, rüzgâr türbinlerinde kullanılan bu metal alaşımları 700 °C sıcaklık seviyelerine kadar çalışabilmektedir (Karakaya, 2010).

2.4.9. Elektrik jeneratörü:

Dişli kutusundan gelen hareketle, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. (http://sinirsizenerji.net/Ruzgar_turbini.aspx, 2011). Rüzgâr türbini jeneratörleri diğer tip jeneratörlere göre biraz daha farklıdır. Bunun sebeplerinden biri, jeneratörün salınımlı güç üreten rüzgâr türbini rotoruyla birlikte çalışmasıdır. 100 kW veya 150 kW üzerindeki büyük rüzgâr türbinlerinde üretilen gerilim üç fazlı alternatif olup, genellikle 690 V değerindedir. Daha sonra rüzgâr türbininin yanına veya kulenin içine monte edilmiş transformatöre yollanır. Şebekeye bağlı olan bu transformatör yardımıyla gerilim 10 kW veya 30 kW arasında bir değere yükseltilir. Bu üreticiler 50 Hz ve 60 Hz olarak üretilmektedir. Rüzgâr türbinlerinde üç tip jeneratör kullanılmaktadır.

- Doğru akım jeneratörleri,
- Senkron jeneratörler,

- Asenkron jeneratörler.

Küçük güçlü sistemlerde eskiden daha fazla kullanılan doğru akım jeneratörleri yerine senkron ve asenkron jeneratörler kullanılmaktadır (Demir, 2007). Doğru akım jeneratörleri, sık bakım gerektirmelerinden ve alternatif akım jeneratörlerine göre daha pahalı olmalarından dolayı büyük güçlü rüzgâr enerjisi tesislerinde tercih edilmemektedir (Güneş, 2006).

Direkt şebekeye bağlantı sistemlerinde; alternatif akım jeneratörlerini oluşturan asenkron ve senkron jeneratörlerinin millerinin devir sayısı $n_{\text{senkron}}=60.f/p$ (d/d) bağıntısı ile verilir. Burada f hertz biriminde elektrik şebekesi frekansı, p çift kutup sayısı ve n dakikada devir sayısıdır (Şipar, 2011).

Dişlideki kayıpları ve gürültüyü azaltmak amacıyla, çok kutuplu jeneratörü olan dişli kutusuz imal edilen türbinler de bulunmaktadır (Güneş, 2006). Yukarıdaki bağıntıdan da anlaşılacağı gibi jeneratörün kutup sayısı arttıkça, 50 Hz'lik elektrik şebekesi frekansına uygun akım için gereken jeneratör mili devir sayısı da azalmaktadır. Bu nedenle, yüksek kutup sayılı jeneratörlerde dişli kutusuna gerek kalmamaktadır (Şipar, 2011).

2.4.10. Anemometre (rüzgâr ölçer) ve yelkovan:

Rüzgâr hızı ve yönünü ölçmek için kullanılır. Anemometre ve yelkovan genellikle gövde üzerine yerleştirilmiştir. Anemometreden gelen elektronik sinyaller, rüzgâr türbininin elektronik kontrol ünitesi tarafından rüzgâr hızı yaklaşık 5 m/s'ye yaklaştığında rüzgâr türbinini çalıştırmak için kullanılır (Demir, 2007).

2.4.11. Yaw mekanizması:

Çark ile birlikte gövde (nasel) yönünü rüzgâra karşı döndürmek üzere elektrik motorlarından yararlanır. Eğim mekanizması rüzgâr yönünü algılayan elektronik kontrol ünitesi tarafından çalıştırılır (Demir, 2007). Yaw dişlisine sabitlenmiş gövde, elektrik motorlarının hareket ettirmesiyle daimi olarak rüzgâra karşı konumlanır (Giovanello and Kaplan, 2008)

2.4.12. Hidrolik sistem:

Türbinin aerodinamik frenlerini ayarlamak için kullanılır. Türbinin aşırı hızlanması durumunda kanat kontrolü ve gövde kontrolü ile yavaşlama sağlanamıyorsa veya bu tür kontrol sistemlerinin bulunmadığı eski tip türbinlerde hidrolik fren sistemi kullanılmaktadır

Yaw frenleri ve çark frenleri için yağ basıncı sağlayan hidrolik sistemlerde genellikle VG 32 hidrolik yağ kullanılmaktadır. Sistemin yağ kapasitesi çoğunlukla 30-50 lt olmaktadır. Kullanılan yağ pompasının gücü ise 1 kW civarındadır (Şipar, 2011).

2.4.13. Soğutma ve filtreleme sistemi:

Mekanik iş yapan ünitelerde açığa çıkan ısının soğurulması ve ısıyı soğurmada kullanılan akışkanın sistem içerisinde dolaşımı esnasında kazandığı kirliliğin giderilmesi için kullanılır.

Rüzgâr türbinlerinde soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulan elemanlar dişli kutusu, jeneratör ve çeviricidir). Bu soğutma sistemleri birbirinden bağımsız çalışmaktadır. Soğutma sistemlerinin amacı söz konusu elemanların en uygun sıcaklıkta çalışmalarını sağlamaktır. Kontrol sistemleri yardımıyla dişli kutusu

yatakları, dişli kutusu yağı, jeneratör ve eviricinin sıcaklıkları sürekli ölçülmektedir (Karakaya, 2010).

Dişli kutusunun çalışması esnasında artan sıcaklığı düşürmek için gövdenin üst kısmında bulunan eşanjör kullanılarak sistem içerisinde soğutma yağı sirküle edilir. Soğutma sistemi iki aşamalı pompa aktarım sistemi kullanılmaktadır. Filtreler; kaba filtre 100 µm ve hassas mesh filtre 10µm özelliğine sahiptir. Yağ ve hava değiştiricisi sıcaklık seviyesi belli bir değer üzerine çıktığında devreye girmektedir (Karakaya, 2010).

Soğutma birimi fanı elektrik jeneratörünü soğutma amacıyla geliştirilmiş kısımdır. Dişli kutusunda kullanılan yağı soğutmak için kullanılan üniteyi de içerir. Diğer taraftan, türbinlerin bazılarının jeneratörleri ise su-soğutmalıdır (Şipar, 2011). Hava soğutmalı sistemlerde jeneratör içerisindeki havanın sirkülasyonu ile soğutma sağlanır. Havanın soğutulması da eşanjör tarafından gerçekleştirilmektedir (Karakaya, 2010).

2.4.14. Elektronik kontrol ünitesi:

Rüzgâr türbininin durumunu sürekli izleyen ve eğim mekanizmasını kontrol eden bir bilgisayar içerir. Bir arıza halinde (örneğin, dişli kutusu veya jeneratörün fazla ısınması) rüzgâr türbinini otomatik olarak durdurur ve telefon modem hattı vasıtasıyla türbin operatörü bilgisayarına uyarı verir (Demir, 2007).

BÖLÜM 3

KULE BOYUNUN SEÇİMİ

3.1. Giriş:

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri dizaynında kule boyu önemli bir faktördür. Günümüzde daha büyük türbinlerin üretilmesi maksadıyla daha yüksek kuleler inşa edilmektedir. Kulelerin yükselmesi ile birlikte ebatları büyüyen türbinlerden daha fazla güç elde edilmesi amaçlanmaktadır.

3.2. Kule Boyunun Rüzgâr Türbininin Güç Üretimine Etkisi:

Rüzgâr tarafından üretilen güç; denklem 1.4'te $N_V = \frac{1}{2} \rho A V^3$ şeklinde ifade edilmiştir. Ortalama rüzgâr hızı ise; boyun fonksiyonu olarak ampirik olarak;

$$V_m(z) = V_m(z_{ref}) \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha$$

denklem 1.3 ile ifade edilmiştir. Bunların yanında; atmosfer içerisinde sıcaklığın yüksekliğe bağlı olarak belli gradyanlarla değişmesinin sonucu olarak yoğunluk da yükseklikle değişmektedir. Böylelikle açıkça görülmektedir ki rüzgâr türbininden elde edilecek olan güç kule boyuna oldukça bağlıdır.

3.2.1. Kule boyu ile rüzgâr hızının değişimi:

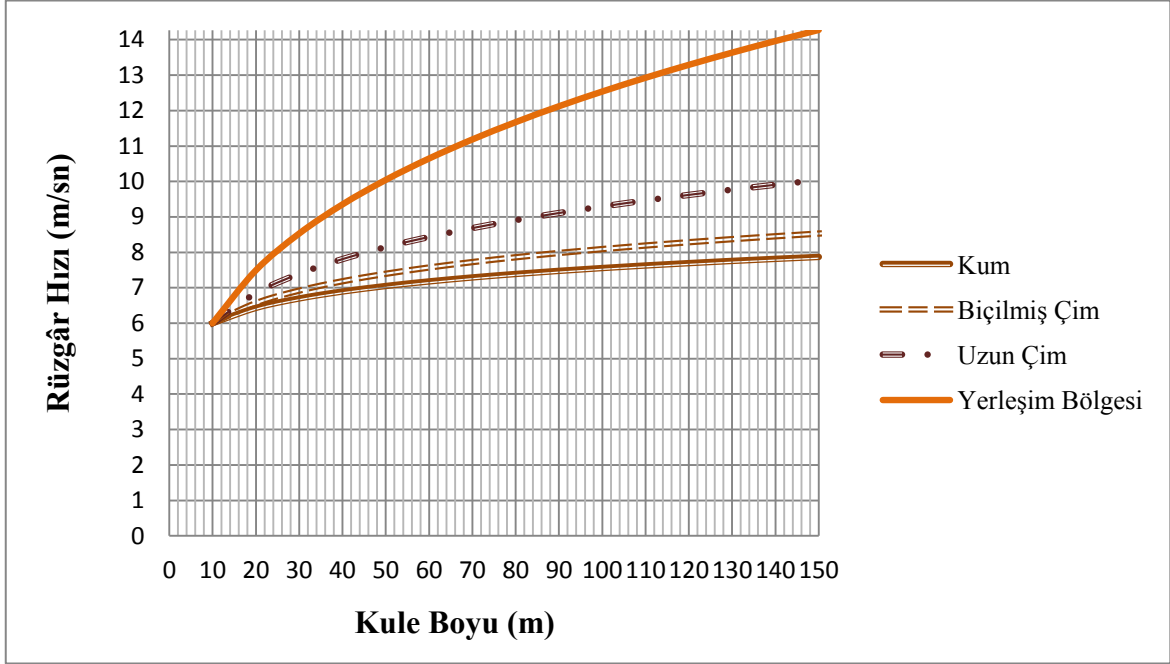
Yüzey sürüklemesi (kara ve denizler) ve havanın viskozitesinden ötürü rüzgâr atmosfer içerisinde yükseğe çıkıldıkça daha hızlı akar. Yükseklik ile hızın değişimi rüzgâr kayması olarak adlandırılmaktadır. Genellikle gündüzleri değişim -7'inci kuvvet yasasına uymaktadır. Rüzgâr hızı, yüzey sürüklemesi olan bölgelerde kule boyunun 7'inci dereceden kökü ile doğrusal olarak artmaktadır. Türbin boyunu iki katına

çıkarılmasıyla beklenen rüzgâr hızı %10 artar, dolayısıyla elde edilmesi beklenen güç de % 34 artacaktır. Geceleri veya daha iyi şartlarda, atmosfer kararlı hale geldiğinde yeryüzüne yakın noktalarda rüzgâr durağanlaşır; ancak kule boyunda hız çok fazla düşmez veya bazen yükselir. Dolayısıyla; geceleri yüksek irtifalarda artacak rüzgâr hızı ile -7'inci kuvvet yasası ile beklenenden çok daha fazla güç elde edilecektir. Kule boyunun iki katına çıkarılmasıyla geceleri %20 ile %60 arasında değişen rüzgâr hızı artışları gözlenebilmektedir (http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE_wind_turbine_tower_height.html).

Kararlı atmosfer yeryüzünün ışımsal soğuması nedeniyle oluşmaktadır ve genellikle ılıman iklimlerde gökyüzü geceleri açık olduğunda oluşur. Yüksek irtifalarda rüzgâr güçlü olduğunda 10 m/s'lik rüzgâr hızı yaklaşık olarak 6-7 m/s artmaktadır (http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE_wind_turbine_tower_height.html).

Denklem 1.3'ü kullanarak 10 m. yükseklikteki rüzgâr hızını 6 m/s alacak olursak Şekil 3.1'de verilen grafik elde edilir.

Hesaplarla elde edilen grafikten görüleceği üzere çevre engellerin yüksek olduğu yerlerde kule boyunun arttırılması ile birlikte rüzgâr hızı oldukça artmaktadır. Grafikte 10 m yükseklikten 150 m yüksekliğe çıkıldığında ortalama rüzgâr hızı; kumluk bölge için % 30, biçilmiş çim bölgesi için %42, uzun çim bölgesi için % 67, yerleşim bölgesi için % 138 artmıştır. Elde edilen güç ise rüzgâr hızının kübü ile orantılı olduğundan yukarıdaki belirtilen bölgelerde 10 m yükseklikten 150 m yüksekliğe çıkıldığında üretilecek güç yaklaşık olarak kumluk bölge için 2, biçilmiş çim bölgesi için 3, uzun çim bölgesi için 5, yerleşim bölgesi için 13 kat artmıştır.



Şekil 3.1. Kule boyu ile rüzgâr hızının değişimi.

3.2.2. Kule boyu ile yoğunluğun değişimi:

Yoğunluk sıcaklığın fonksiyonu olarak değişmektedir. Atmosfer içerisinde yüksekliğe bağlı olarak sıcaklık belli katmanlarda değişmektedir. Dolayısıyla, kule boyunun artmasıyla birlikte çarkı çeviren rüzgârın yoğunluğunda da değişim gözlenecektir.

3.2.2.1. Atmosfer katmanları:

Dünya atmosferi troposfer, stratosfer, iyonosfer ve egzozfer olmak üzere dört tabakadan meydana gelmektedir.

Troposfer; genellikle bulutların oluştuğu ve türbülanslı hava şartlarının bulunduğu tabakadır. Boyu ekvatorda 8.500 m, ekvatorda 16.000 m dolayındadır.

Stratosfer; 32 km ile 80 km irtifalara kadar yer alır. Sağanak şeklindeki rüzgârlara bu tabakada rastlanmaz, genellikle düzgün rejimli rüzgârlar bulunmaktadır.

İyonosfer; Stratosfer vasıtasıyla stratosferden ayrılır. İyonosfer içerisinde çok sayıda elektriksel olaylar cereyan etmektedir. Bu bölgede iyonlar mevcut olup, iyonizasyon olayı irtifa ile daha da artar.

Egzosfer; 450 km ile 900 km irtifalar arasında yer alan bu bölgede moleküllerin sayısı iyice azalır (Yükselen, 1993).

3.2.2.2. Atmosfer içerisinde sıcaklığın yükseklik ile değişimi:

Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (International Civil Aviation Organisation-ICAO) tarafından kabul edilen standart atmosfer şartları atmosferin deniz seviyesindeki basınç ve sıcaklığını ve bunun yanında sıcaklığın irtifa ile değişimini belirler. ICAO'ya göre deniz seviyesindeki standart atmosfer şartları:

Sıcaklık : 15 °C = 288.16 K

Basınç : 760 mmHg

şeklinde dir. Deniz seviyesinde atmosferin diğer özellikleri bilinen termodinamik bağıntılar vasıtasıyla hesaplanır. Standart atmosfer için ayrıca şu kabuller yapılır:

- a) Hava kuru ve mükemmel bir gazdır.
- b) Yer çekimi ivmesinin atmosferin çeşitli tabakalarında irtifa ile değişmediği kabul edilmektedir.
- c) Sıcaklık, atmosferin değişik tabakalarında belli gradyanlarla değişir. Atmosferin farklı iki irtifasındaki sıcaklıklar genel olarak;

$$T_2 = T_1 + a.(h_2-h_1) \quad (3.1)$$

Burada ;

T : Sıcaklık (K),

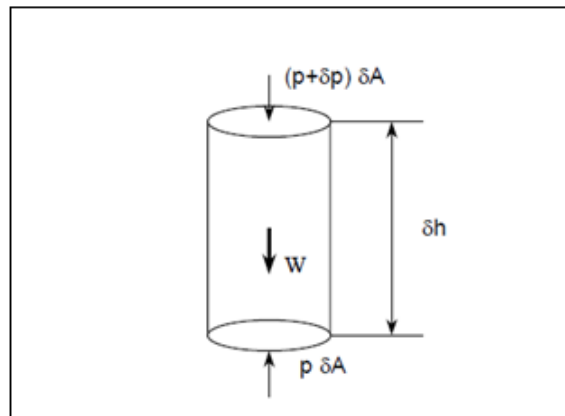
h: Yükseklik (m)

Bağıntıdaki a gradyantının çeşitli yüksekliklerdeki değerleri Çizelge 3.1’de verilmektedir (Yükselen, 1993).

Çizelge 3.1. Çeşitli yüksekliklerde sıcaklık gradyanı (Yükselen, 1993).

h (m)	a = dT/dh
0	-6,5 °C/km
11.000 – 25.000	0
25.000 – 47.300	2,96 °C/km
47.300 – 53.500	0
53.500 – 75.800	-3,85 °C/km
75.800 - 91.300	0

3.2.2.3. Troposfer için yoğunluk hesabı:



Şekil 3.2. Hidro/aero-statik taşıma (Yükselen, 1993).

Atmosferin herhangi bir irtifasında Şekil 3.2’de verildiği gibi alınan silindirik bir akışkan elemanın aerostatik dengesi göz önüne alınarak basınçla yükseklik arasında;

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dh \quad (3.2)$$

bağıntısı yazılabilir (Yükselen, 1993)..

Diğer taraftan, standart atmosfer şartlarında hava mükemmel bir gaz olarak kabul edilebildiğine göre hal denklemi de geçerlidir:

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (3.3)$$

Bu iki bağıntı birlikte kullanılarak;

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R} \frac{dh}{T} \quad (3.4)$$

elde edilir. Ayrıca deniz seviyesinde sıcaklık T_0 ve troposfer içerisindeki sıcaklık gradyanı $\lambda = 6,5$ K/km olmak üzere troposferdeki sıcaklığın yükseklik ile değişimi;

$$T = T_0 - \lambda \cdot h \quad (3.5)$$

şeklinde tanımlanırsa, $dh = -dT / \lambda$ olup,

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{\lambda R} \frac{dT}{T} \quad (3.6)$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{g}{\lambda R}} \quad (3.7)$$

elde edilir. Yoğunluk değişimi için benzeri bir bağıntı hal denklemi yardımıyla;

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p/(RT)}{p_0/(RT_0)} = \frac{p}{p_0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1} \quad (3.8)$$

yazılarak;

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{g}{\lambda R} - 1} \quad (3.9)$$

şeklinde elde edilir. Troposferde $\lambda=6,5$ K/km olup, $R=287$ J/kg.K ve $g=9,806$ m/sn² değerleri kullanılarak;

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{4,256} \quad (3.10)$$

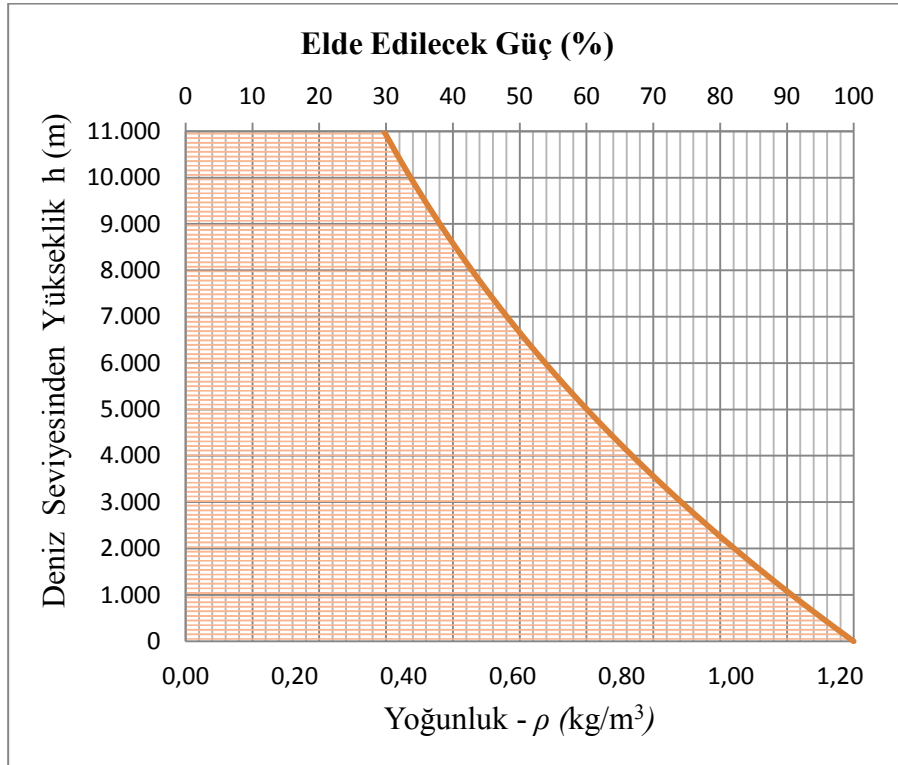
bulunur (Yükselen, 1993).

Yukarıdaki formüller kullanılarak; yoğunluğun yükseklik ile değişimine yönelik yapılan hesaplamalar için Çizelge 3.2'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 3.2. Deniz seviyesinden itibaren 200 m yüksekliğe yoğunluğun değişimi.

h (m)	T (°C)	T (K)	ρ (kg/m ³)
0	15	288,16	1,2256
10	14,94	288,10	1,2244
20	14,87	288,03	1,2232
30	14,81	287,97	1,2221
40	14,74	287,90	1,2209
50	14,68	287,84	1,2197
60	14,61	287,77	1,2186
70	14,55	287,71	1,2174
80	14,48	287,64	1,2162
90	14,42	287,58	1,2150
100	14,35	287,51	1,2139
110	14,29	287,45	1,2127
120	14,22	287,38	1,2115
130	14,16	287,32	1,2104
140	14,09	287,25	1,2092
150	14,03	287,19	1,2080
200	13,70	286,86	1,2022

Çizelge oluşturulurken deniz seviyesinde kurulabilecek bir rüzgâr türbini ele alınmıştır. Kule boyu günümüz tasarımları göz önünde tutularak 0-200 m aralığında değerlendirilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere kule boyuna bağlı olarak çark alanından geçecek havanın yoğunluğunun değişimi her 100 m için $0,01 \text{ kg/m}^3$ azalmaktadır. Dolayısıyla kule boyunun arttırılmasıyla hava yoğunluğunda oluşacak azalmanın etkisiyle türbinden elde edilecek güçte önemsenmeyecek ölçüde bir düşme olur. İrtifa ile yoğunluğun değişimi rüzgâr türbininin kurulacağı bölgenin deniz seviyesinden yüksekliği açısından ele alındığında Şekil 3.3'deki gibi bir grafik oluşacaktır. Dolayısıyla deniz seviyesinden 1000 m yüksekliğe kurulacak olan bir rüzgâr türbini deniz seviyesinde kurulacak bir rüzgâr türbininin yaklaşık olarak % 90'ı kadar güç üretebilecektir. Bu durumda rüzgâr türbini kurulum sahalarının deniz seviyesine yakın bölgelerde oluşturulması tercih sebebi olmalıdır. Yine de böyle bir güç kaybı söz konusu olduğunda çark çapı arttırılarak güç kaybı engellenebilir.

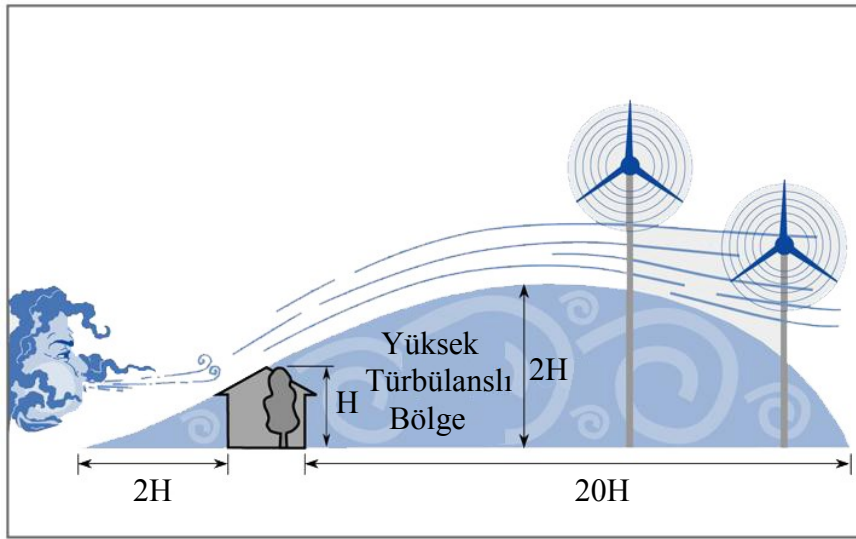


Şekil 3.3. Deniz seviyesinden itibaren yükseklikle yoğunluğun değişimi.

3.3. Kule Boyu Seçiminde Çevre Etkisi:

Zemin sürüklenme kuvvetleri ve türbülanslı akımların etkilemesi sonucu küçük ve orta güçlü rüzgâr türbinlerinin kurulumu sırasında; rüzgâr türbini çarkının, kurulacak kulenin 150 m çevresindeki engellerin tamamından en az 9 m yüksek olması standart bir kuraldır. Bunun ötesinde kule boyunun arttırılması da yeryüzünün rüzgâr akışına karşı ortaya koyduğu sürüklenme kuvvetinin giderek azalmasına sebep olacaktır (Rules of Thumb for Siting Wind Turbines, <http://www.renewwisconsin.org/wind/Toolbox-Homeowners/Rules%20of%20Thumb%20for%20Tower%20Heights.pdf>, 2011).

Diğer taraftan Şekil 3.4’de verildiği üzere çevredeki yüksekliklerin etkisiyle oluşacak türbülanslı akım etkilerini ortadan kaldırmak için rüzgâr türbinlerinin yerleştirilmesi esnasında çevredeki engellerin boyu (H)’nin fonksiyonu olarak yerleşim düzeni hesaplanabilir. Genel olarak türbülanslı bölgenin boyu çevredeki engellerin boyunun iki katıdır. Hesaba katılması gereken bir diğer şey ise rüzgâr türbininin kurulacağı alan çevresindeki ağaçların yaşıdır. Rüzgâr türbini kurulumu esnasında 6 m yükseklikte olan ağaçlar kurulumdan 25 yıl sonra yaklaşık 15-18 m yüksekliğe ulaşacaklardır.



Şekil 3.4. Rüzgâr türbini çevresindeki ev veya ağaç engellerinin türbülans etkisi, (<http://www.centralwestsolar.com.au>, 2011).

Bu yüzden kule boyu çevredeki ağaçların boyunun değişeceği göz önüne alınarak hesaplanmalıdır (<http://www.renewwisconsin.org>, 2011). Yüksek kulelerin tasarımı esnasında, rüzgâr türbini etrafındaki dinamik etkiler ele alınırken genellikle rüzgâr yüklerinin etkisi düşünülerek hesaplamalar yapılır. Ancak yüksek kulelerde yeryüzü kaynaklı sismik etkilerde hesaba katılmalıdır. Depremlerin birçoğunun oluşturduğu frekans 33 Hz'den daha azdır. Eğer rüzgâr türbininin rezonans frekansı 33 Hz'den daha düşükse rezonans kaynaklı aşırı gerilmeler kule bünyesinde oluşabilecektir (<http://www.altairhtc.com>, 2011)

Dolayısıyla yüksek kuleler tasarlanırken güvenlik katsayıları sismik etkiler de hesaba katılarak aşırı yüklenmeye karşı yüksek tutulmalıdır.

3.4. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Kule Tipleri ve Boyları:

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde Şekil 3.5'de verildiği üzere kafes yapılı, gergi halatlı ve tek direk kuleler olmak üzere üç tipte kule kullanılmaktadır.



Şekil 3.5. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kullanılan kule tipleri, (<http://www.centralwestsolar.com.au>, 2011).

3.4.1. Kafes yapılı kuleler:

Kafes yapılı kuleler; çelik profillerin kaynakla birleştirilmesi sonucu oluşturulurlar. Genellikle 2 kW ile 20 kW güç üreten küçük tipte yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kullanılırlar. Kafes yapılı kulelerin yükseklikleri 16 m ile 32 m arasında değişmektedir (<http://www.centralwestsolar.com.au>, 2011).

3.4.2. Gergi halatlı kuleler:

Gergi halatlı kuleler; dar çelik borulardan imal edilerek gergi halatları ile desteklenirler. Genellikle 500 W ile 5 kW güç üreten küçük tipte yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kullanılırlar. Gergi halatlı kulelerin yükseklikleri 6 m ile 18 m arasında değişmektedir (<http://www.centralwestsolar.com.au>, 2011).

3.4.3. Tek direk kuleler:

Tek direk kuleler; serbest duran kuleler olarak da adlandırılır. Genellikle 2 kW ile 50 kW güç üreten küçük tipte yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kullanıldıklarında yükseklikleri 12 m ile 36 m arasında değişmektedir (<http://www.centralwestsolar.com.au>, 2011).

3.5. Kule Boyu Seçimi İle İlgili Yasal Düzenlemeler:

12 Haziran 2002 tarih ve 2002/4390 numaralı Bakanlar Kurulu kararı ile binaların yangından korunması hakkında yayımlanan yönetmeliğe göre; bina boyu, binanın kot aldığı noktadan saçak seviyesine kadar olan mesafe veya imar planı ve bu yönetmelikte öngörülen yüksekliktir. Dolayısıyla, inşa yükseklikleri imar planları ile düzenlenmektedir (<http://www.mevzuat.adalet.gov.tr>, 2011).

Türkiye’de 29 Aralık 2010 tarihli ve 6094 sayılı Kanunun hükmü uyarınca 31 Aralık 2015 tarihine kadar işletmeye giren rüzgâr enerjisi santrallerinde üretilecek enerjiye uygulanacak fiyat 7,3 ABD Doları cent/kWh olarak belirlenmiştir. 31 Aralık 2015 tarihine kadar işletmeye giren rüzgâr enerjisi santrallerinin yurt içinde gerçekleşen türbin kulesi imalatına 5 yıl süre ile ödenecek yerli katkı ilavesi 0,6 ABD Doları cent/kWh’dır (www.mevzuat.gov.tr). Yerli üretimi teşvik etmesi bakımından bu sürenin uzatılması beklenilmektedir.

Rüzgâr türbinlerinin yükseklikleri ile alakalı olabilecek bir başka düzenleme ise Uluslar Arası Sivil Havacılık Organizasyonu (ICAO)’nun hava alanlarının çevresindeki engellere yönelik kısıtlamalar ile ICAO EK-14’te yapılmıştır. Buna göre uçakların kalkış ve iniş rotalarına giren engellere izin verilmemektedir (<http://www.sustainability.vic.gov.au,2011>). Kalkış ve iniş rotası dışında kalan engeller için ICAO;

- Rüzgâr türbini havaalanı çevresinde engel olarak tanımlanacak olursa, türbinin işaretlenmesini veya ışıklandırılmasını,
- Çark ve gövde ile kulenin üstte kalan 2/3’lük kısmının beyaz boyanmasını tavsiye etmektedir.

Bunların yanında; hava alanları çevresinde kurulan ve uçuşa engel oluşturabilecek tesisler NOTAM (Notice To Airman) ile yayımlanarak uçucu personel bilgilendirilmektedir (<http://www.sustainability.vic.gov.au,2011>).

BÖLÜM 4

ÇARK ÇAPININ SEÇİMİ

4.1. Giriş:

Hangi ölçüde türbinin minimum maliyetle enerji üreteceği uzun bir süre şiddetle tartışılmıştır. Kurulum alanı ekonomisi ve rüzgâr hızının yükseklikle değişmesi büyük makinelerin kahramanlarının lehine olmuştur. Diğer taraftan; “kare-küp kuralı”na göre çapın karesi ile güç üretimi artarken, rotor kütlelerinin (ve dolayısıyla maliyetlerin) küp oranında artması karşı bir tartışma olarak ileri düzeydedir (Burton, T., et.al., 2001).

Gerçekte her iki tartışma konusu da doğruluklar içermektedir. Ölçek ve rüzgâr kaymasını hesaba katan “kare-küp kuralı” değişkenlerinin ekonomisi arasında avantaj/fayda ikilemi bulunmaktadır (Burton, T., et.al., 2001). Dolayısıyla, iki avantajın veya yararlı durumun birinden diğeri adına vazgeçmek gerekmektedir.

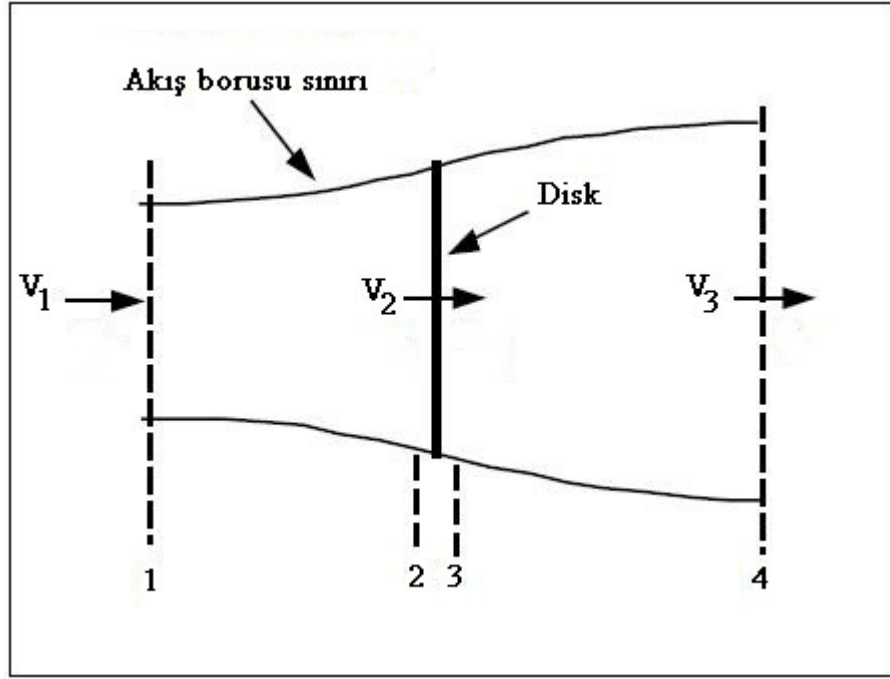
4.2. Çark Çapının Rüzgâr Türbininin Güç Üretimine Etkisi:

Güç; V hızıyla A alanından geçen bir rüzgâr için; denklem 1.4’te $N_V = \frac{1}{2}\rho AV^3$ şeklinde ifade edilmiştir. Buradan görülmektedir ki; rüzgâr türbini çarkının çapında olacak bir değişiklik elde edilecek gücü çapın ikinci kuvveti oranında etkileyecektir. Dolayısıyla güç gereksinimlerine bağlı olarak çapta yapılacak değişikliklerle istenilen değerlerde ayarlama yapmak mümkündür.

4.3. Betz Limit:

İdeal bir türbin çarkından elde edilecek gücü, rüzgârın ideal çark üzerindeki etkisi ve çark operasyonunun yerel rüzgâr alanları üzerindeki etkisini hesaplamak için

genel olarak Betz'e atıf edilen basit bir model kullanılabilir. Bu basit model bundan yüz yıl önce gemi çarklarının performansını tahmin etmek için geliştirilmiştir ve bir lineer momentum teorisine dayanmaktadır (Manwell et.al., 2009).



Şekil 4.1. Disk modeli, (Manwell et.al., 2009).

Teori bir akım borusu ve bu akım borusunun iki kesit alanını kontrol hacmi olarak kabul eder (Bkz. Şekil 4.1). Akış lineer ve akım borusunun kesitlerine diktir. Akım borusu içerisine yerleştirilen türbin tekparça bir disk olarak kabul edilir ve disk akım borusu içerisinde akan havanın basıncında bir süreksizlik oluşturur. Şu bilinmelidir ki, bu analiz herhangi bir tip rüzgâr türbini ile sınırlı değildir. Bu analize göre aşağıdaki kabuller yapılmıştır (Manwell et.al., 2009).

- Homojen, sıkıştırılamaz, kararlı hal akışkan akışı,
- Sürtünme sürüklemesi yok,
- Sonsuz sayıda kanat,
- Disk veya çark üzerinde düzgün dağılımlı itki,

- Geri dönmeyen akım,
- Çarkın karşı ve arka akışının uzağında statik basınç, bozulmamış çevre statik basıncına eşittir (Manwell et.al., 2009).

Tüm sistemi kapsayan kontrol hacmine lineer momentumun korunumunu uygulayarak kontrol hacmi içerisindeki üzerine gelen net kuvvet kolaylıkla hesaplanabilir. Bu kuvvet rüzgârın rüzgâr türbini üzerindeki gücü olan itkiye (T) eşit büyüklükte olup zıt yönlüdür. Bir boyutlu, sıkıştırılmaz ve zamana bağlı olmayan akışta lineer momentum'un korunumundan dolayı itki hava akımının momentumundaki değişime eşit olup zıt yönlüdür (Manwell et.al., 2009):

$$T = V_1(\rho AV)_1 - V_4(\rho AV)_4 \quad (4.1)$$

Burada ρ havanın yoğunluğu, A kesit alan, V havanın hızı ve alt indisler ise kesit alanların konumunu belirtmektedir (Bkz. Şekil 4.1) (Manwell et.al., 2009).

Kararlı akış için; $(\rho AV)_1 = (\rho AV)_4 = \dot{m}$ olarak yazılabilir. Burada \dot{m} kütle akış oranıdır. Dolayısıyla;

$$T = \dot{m} (V_1 - V_4) \quad (4.2)$$

İtki pozitif olduğundan çark arkasındaki hız V_4 serbest akış hızından daha düşüktür. Türbin çarkının her iki tarafında herhangi bir iş yapılmamaktadır. Dolayısıyla diskin her iki tarafındaki kontrol hacimleri için Bernoulli denklemi kullanılabilir. Akış borusunda diskin üst akış çizgisinde;

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (4.3)$$

Akış borusunda diskin alt akış çizgisinde;

$$p_2 + \frac{1}{2}\rho V_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho V_4^2 \quad (4.4)$$

Burada akış çizgilerinin çok uzağında basınçların eşit olduğu ($p_1=p_4$) ve diskin ortasından geçen hızın sabit ($V_2=V_3$) olduğu kabul edilmektedir.

Bunun yanında itki diskin her iki tarafındaki kuvvetlerin net toplamı olarak da belirtilebilir.

$$T = A_2(p_2 - p_3) \quad (4.5)$$

Eğer ($p_2 - p_3$) denklem (4.3) ve denklem (4.4) kullanılarak denklem (4.5) de yerine konulursa;

$$T = \frac{1}{2} \rho A_2 (V_1^2 - V_4^2) \quad (4.6)$$

elde edilir (Manwell et.al., 2009).

İtke değerlerini denklem (4.2) ve denklem (4.6)'yı kullanarak eşitleyerek ve kütle akış değerini $\rho A_2 V_2$ olarak tanımlayınca;

$$V_2 = \frac{V_1 + V_4}{2} \quad (4.7)$$

elde edilir (Manwell et.al., 2009).

Dolayısıyla çark düzleminde hız, bu basit modeli kullanarak, karşı ve arka akışların ortalamasıdır (Manwell et.al., 2009).

Eğer a bir aksenal indüksiyon faktörü; serbest akım ve çark düzlemi arasındaki kesirli azalma olarak tanımlanırsa;

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (4.8)$$

$$V_2 = V_1(1 - a) \quad (4.9)$$

ve

$$V_4 = V_1(1 - 2a) \quad (4.10)$$

olur (Manwell et.al., 2009).

V_1a miktarı genellikle çarkın indüklenmiş hızı olarak anılır, bu durumda çarktaki rüzgâr hızı serbest akış hızı ve uyarılan rüzgâr hızının bir kombinasyonudur. Eksenel indüksiyon faktörü sıfırdan düşük olursa, çark arkasındaki rüzgâr hızı çok çok daha az yavaşlar. Eğer $a=1/2$ ise; rüzgâr çark arkasında sıfır hıza yavaşlar ve basit teori uygulanamaz (Manwell et.al., 2009).

Güç çıkışı N ; diskteki hızın itki ile çarpılmasına eşittir:

$$N = \frac{1}{2}\rho A_2(V_1^2 - V_4^2)V_2 = \frac{1}{2}\rho A_2V_2(V_1 + V_4)(V_1 - V_4) \quad (4.11)$$

V_2 ve V_4 değerleri için (4.9) ve (4.10) eşitlikleri kullanıldığında;

$$N = \frac{1}{2}\rho A_2V^34a(1 - a)^2 \quad (4.12)$$

Elde edilir.

Rüzgâr türbini çark performansı genellikle güç katsayısı ile karakterize edilir; C_p :

$$C_p = \frac{N}{\frac{1}{2}\rho V^3A} = \frac{\text{Çark Gücü}}{\text{Rüzgâr İçerisindeki Güç}} \quad (4.13)$$

Boyutsuz güç katsayısı, çark tarafından üretilen gücün rüzgâr içerisindeki güce bölünmesidir. Denklem (3.12)'den, güç katsayısı;

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (4.14)$$

Dolayısıyla, güç katsayısının a 'ya göre türevi alınarak sifıra eşitlendiğinde; $a=1/3$ bulunur. Öyleki azami C_p , $a = 1/3$ olduğunda;

$$C_{p,maks.} = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (4.15)$$

elde edilir ve Betz limiti olarak bilinir (Manwell et.al., 2009).

Bunun yanında; toplam türbin verimi, rüzgâr türbininin çark güç katsayısı ve mekanik veriminin bir fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi yazılır;

$$\eta_T = \frac{N_{efektif}}{\frac{1}{2}\rho AV^3} = \eta_m C_p \quad (4.16)$$

Dolayısıyla;

$$N_{efektif} = \frac{1}{2}\rho AV^3(\eta_m C_p) \quad (4.17)$$

şeklinde ifade edilir (Manwell et.al., 2009).

4.4. Çark Çapı Seçiminde Çevre Etkisi:

Rüzgâr türbinlerinin çevre üzerinde olumlu etkileri bulunduğu gibi olumsuz etkileri de mevcuttur. Bunlardan biri de kuşların göçleri esnasında rüzgâr türbinlerinin çarklarına çarparak ölmeleridir. İlk rüzgâr türbinleri hızlı dönen küçük kanatlara sahip olduğundan kuş ölümleri çoklukla gözlemlenmekteydi. Ancak rüzgâr türbini çark çapının artmasıyla birlikte kanatlar kuşlar açısından daha görünür hızlarda dönmeye başlamışlardır. Böylelikle, görünür kanatlar sayesinde kuş ölümlerinde azalmanın olduğu gözlemlenmiştir (Masters, 2004).

Diğer taraftan, rüzgâr türbini çark çapının artmasıyla birlikte daha yavaş dönecek olan kanatların oluşturacağı gürültü etkisi de azalacaktır.

4.5. Çark Çapına Bağlı Fonksiyon İle Maliyet Modellemesi:

Türbin dizaynını oluşturan parametrelerin değerlerindeki değişimin enerji maliyetine hassasiyeti, parça maliyetlerinin etkilenmesi yolunu kullanan bir model yardımıyla incelenebilir. Normal prosedür maliyetleri bilinen çeşitli bileşenler için temel bir tasarımla başlamaktır. Parça maliyeti ve kütlesi arasında aşağıdaki lineer bağıntı yazılabilir (Burton et.al.,2001).

$$C(x) = C_T \left(\mu \frac{m(x)}{m_T} + (1 - \mu) \right) \quad (4.18)$$

Burada $C(x)$ ve $m(x)$ sırasıyla parçanın maliyet ve kütle dizayn parametreleri x değerini aldığı durumdaki fonksiyonudur. C_T ve m_T temel yapılandırma değerleridir, μ ise kütle ile değişen maliyetin oranıdır (Burton et.al.,2001).

Makine boyutu optimizasyonu için basitleştirilmiş bir maliyet modeli aşağıdaki gibi örneklenmiştir. 60 m'lik çark çapına sahip 1,5 MW gücündeki türbinin çeşitli bileşenlerinin maliyetleri başlangıçtaki makine tasarımı olarak ele alınmıştır. Bunların toplam maliyet içerisindeki yüzdesi Çizelge 4.1'de verilmiştir (Burton et.al.,2001).

Diğer çaplar için makine dizaynı dişli kutusu, jeneratör, şebeke bağlantısı ve kontrol ünitesi hariç diğer bileşenlerin tüm ölçülerinin aynı oranda ölçeklendirilmesiyle belirlenir. Sabit uç hızını ve verilen bir rüzgâr sabit uç hız oranını muhafaza etmek maksadıyla açılma hızı çark çapı ile ters orantılı olarak alınır. Sonuç olarak; tüm makine tasarımları aynı rüzgâr hızında oransal bir güce ulaşır, dolayısıyla bu elde edilen güçlerin oranı da çark çapının karesi ile doğru orantılıdır (Burton et.al.,2001).

Çizelge 4.1. 1,5 MW'lık 60 m çark çapına sahip rüzgâr türbininin bileşenlerinin toplam makine maliyetine yüzde olarak oranı, (Burton et.al.,2001).

Bileşen	Toplam Maliyet İçerisindeki Yüzdesi
Kanatlar	%18,3
Çark Göbeği	% 2,5
Ana Şaft	% 4,2
Dişli Kutusu	% 12,5
Jeneratör	% 7,5
Gövde (Nasel)	% 10,8
Yunuslama Sistemi	% 4,2
Kontrol	% 4,2
Kule	% 17,5
Fren Sistemi	% 1,7
Temel	% 4,2
Montaj	% 2,1
Nakliye	% 2,0
Şebeke Bağlantıları	% 8,3
TOPLAM	% 100

Diğer taraftan, düşük hız şaftının tork değeri çark çapının kübü ile orantılıdır ve bu da dişli kutusu oranı değişmesine rağmen dişli kutusu kütesinin çark çapının kübü ile orantılı olarak değişmesi kabulünün yapılmasına temel oluşturur. Basitleştirme açısından $\mu=0,9$ olarak alınırsa; jeneratör, kontrol ünitesi ve şebeke bağlantısı haricindeki tüm bileşenlerin maliyeti D çark çapındaki bir türbin için aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$C_1(D) = 0,8C_T(60) \left(0,9 \left(\frac{D}{60} \right)^3 + 0,1 \right) \quad (4.19)$$

burada $C_T(60)$ temel tasarım olarak alınan makinenin toplam maliyetidir (Burton et.al.,2001).

Jeneratör ve şebeke bağlantısı maliyetlerinin payı ise çark çapının yalnızca karesi ile orantılıdır. Denklem (4.18)'de kütleler oranlarla değiştirilerek bu bileşenlerin maliyetlerine uygulanabileceği kabul edilir. Dolayısıyla, eğer μ bir kez daha 0,9 olarak alınacak olursa, jeneratör ve şebeke bağlantısının çark çapına bağlı fonksiyon ile ifadesi aşağıdaki gibi

$$C_2(D) = 0,158C_T(60) \left(0,9 \left(\frac{D}{60} \right)^2 + 0,1 \right) \quad (4.20)$$

olacaktır (Burton et.al.,2001).

Bunların yanında, kontrol elemanının maliyeti sabit olarak kabul edilir. Sonuç olarak; çark çapının bir fonksiyonu olarak toplam türbin maliyeti aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$C_T(D) = C_T(60) \left(0,8 \left\{ 0,9 \left(\frac{D}{60} \right)^3 + 0,1 \right\} + 0,158 \left\{ 0,9 \left(\frac{D}{60} \right)^2 + 0,1 \right\} + 0,042 \right) \quad (4.21)$$

denklem düzenlenecek olursa;

$$C_T(D) = C_T(60) \left(0,72 \left(\frac{D}{60} \right)^3 + 0,1422 \left(\frac{D}{60} \right)^2 + 0,1378 \right) \quad (4.22)$$

elde edilir (Burton et.al.,2001). Böylelikle temel konfigürasyon bir rüzgâr türbini baz alınarak yukarıdaki şekilde çark çapı değişimlerine göre türbin maliyeti değişimleri öngörülebilir.

BÖLÜM 5

KANAT PROFİLİNİN SEÇİMİ

5.1. Giriş:

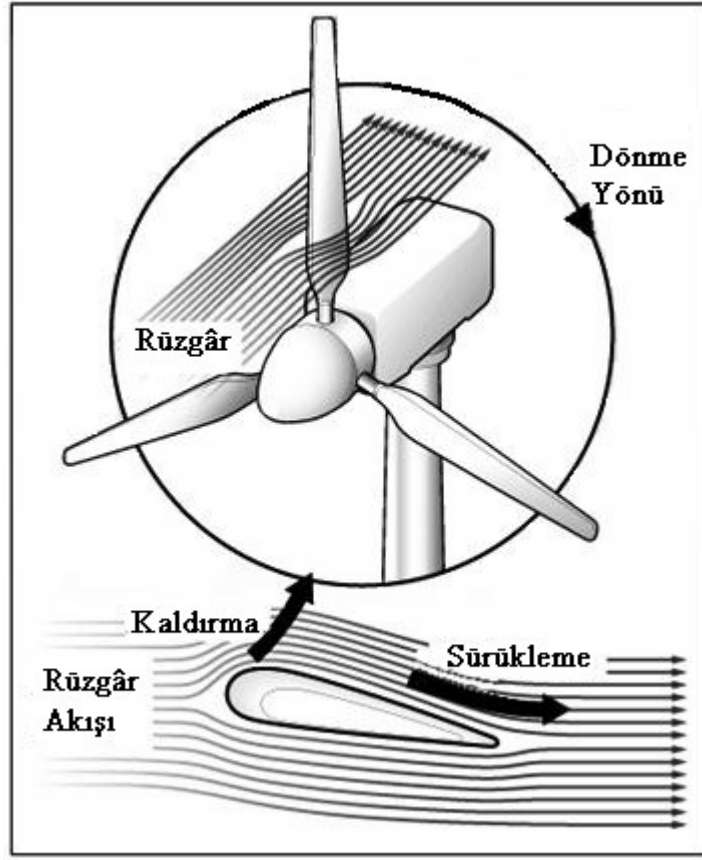
Rüzgârdaki kinetik enerjinin mümkün olduğunca az kayıpla çark miline aktarılabilmesi rüzgâr türbininden elde edilecek olan toplam verimi de etkilemektedir. Dolayısıyla çark üzerinde kullanılan kanatların rüzgârdan maksimum enerjiyi çekebilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Bu noktada kanat aerodinamiği, kanat üzerine akan rüzgârın kanat üzerinde oluşturacağı aerodinamik kuvvetlerin etkisi ve kanat uç hızı oranına göre kullanılacak olan kanat sayısının belirlenmesi önem kazanmaktadır. Bunların yanında kanat profilinin değişimi ile birlikte elde edilecek verim de değiştirilebilmektedir.

5.2. Kanat Aerodinamiği:

Kaldırma kuvveti oluşturarak çarkı döndürmek maksadıyla kanatların kesit alanı aerodinamik profiller kullanılarak tasarlanır. Kesit alanı uçlara doğru daraltılarak kanat ucu etkileri azaltılır. Böylelikle türbülans etkileri de azaltılmış olur. Diğer taraftan profil kesit alanı kanat köküne doğru arttırılarak yapısal özellikle eğilme momenti yüklerinin karşılanması hedeflenir. Bunların yanında belirgin rüzgâr açısı da kanat boyunca hız değiştiğinden değişmektedir; dolayısıyla optimum hücum açısının elde edilebilmesi için kanat uzunluğu boyunca burulmaktadır (<http://www.gurit.com>, 2011).

Şekil 5.1’de rüzgâr türbini kanadı üzerine etkileyen temel aerodinamik kuvvetler gösterilmiştir. Rüzgâr türbini kanatları kanat üzerinden akan rüzgârın etkisiyle oluşan kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri tarafından çarkın döndürülmesiyle hareket ederler (<http://science.howstuffworks.com>, 2011).



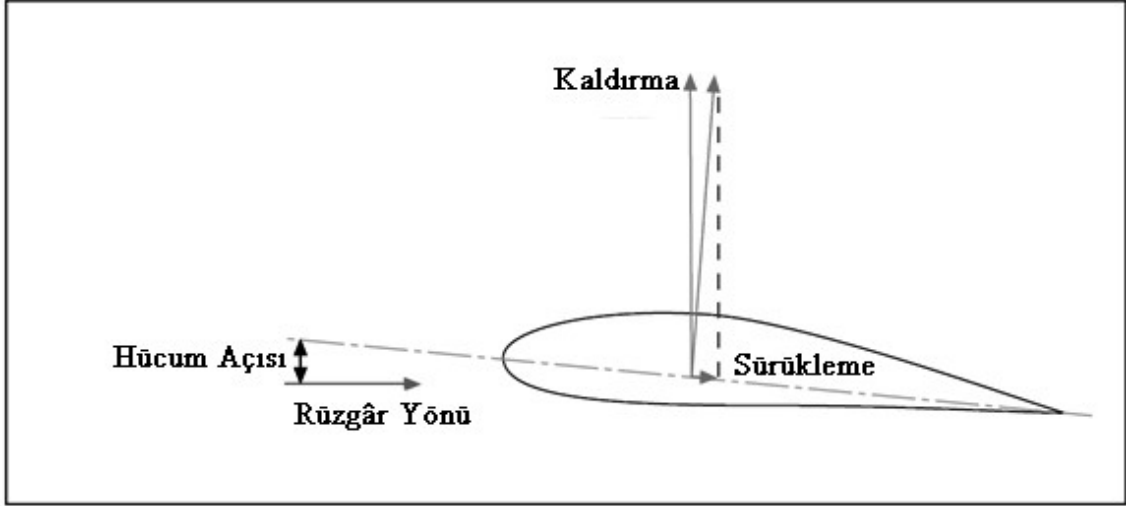
Şekil 5.1. Kanat üzerine etkiyen temel kuvvetlerin gösterimi, (<http://science.howstuffworks.com>, 2011).

5.2.1. Kanat profili aerodinamiği:

Uçak kanatlarına benzer şekilde, rüzgâr türbini kanatları da aerodinamik şekillerinden ötürü kanat profiline üzerinde akan rüzgârdan kaldırma kuvveti elde ederek çarkın dönmesine olanak verirler (<http://www.gurit.com>, 2011).

Şekil 5.2’de verilen profil üst yüzey uzunluğu alt yüzey uzunluğundan daha uzun olduğundan akışkan profil üst kısmında daha hızlı hareket ederek basınç düşmesine neden olacaktır. Böylelikle profilin alt ve üst kısmı arasında oluşan basınç farkı nedeniyle profil üzerinde düşey ekseninde bir kaldırma kuvveti oluşacaktır. Diğer taraftan profil kesitine karşı gelen rüzgâr da profil üzerinde bir sürüklenme kuvveti

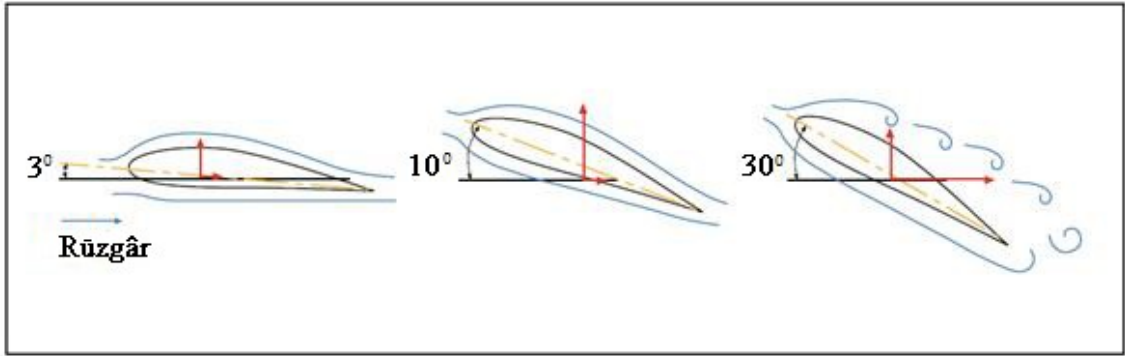
oluşturacaktır. Neticede aerodinamik merkez üzerinde bileşmeleri alınan net kuvvet etkisiyle kanat dönecektir.



Şekil 5.2. Kanat profili üzerinde kaldırma ve sürüklenme, (<http://www.gurit.com>, 2011).

Hücum açısının artırılması ile birlikte kaldırma kuvveti artar; ancak yüksek hücum açılarındaki stall oluşacağından kaldırma kuvveti yine düşecektir. Bunun için optimum hücum açısının belirlenmesi gerekmektedir (<http://www.gurit.com>, 2011) (Bkz. Şekil 5.3).

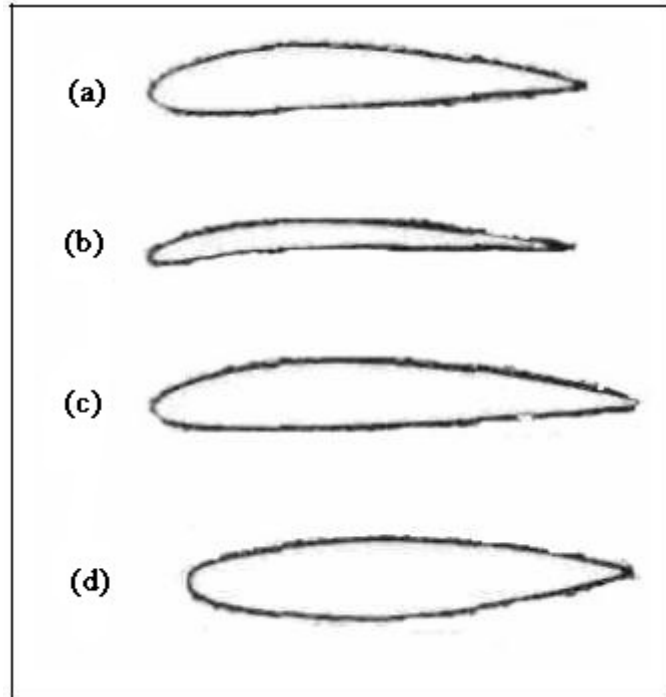
Diğer taraftan sürüklenme kuvveti de rüzgâr akışına paralel olduğundan yüksek hücum açılarındaki artacaktır. Eğer profil şekli iyiye kaldırma kuvveti sürüklenme kuvvetinden çok daha büyük olacaktır. Ancak stall oluşmaya başladığında sürüklenme kuvveti hızlı bir şekilde artacağından maksimum kaldırma açısından çok az düşük olan bir açıda kanat maksimum kaldırma/sürüklenme oranına ulaşacaktır. Bu noktadaki hücum açısında elde edilen azami kaldırma/sürüklenme oranı kanadın optimum çalışma sahasıdır.



Şekil 5.3. Farklı hücum açılarındaki kaldırma kuvvetinin değişimi, (<http://www.gurit.com>,2011).

5.2.2. Kanat profillerinin şekilleri:

Simetrik ve asimetric olmak üzere iki temel kanat profili vardır. Şekil 5.4'te simetrik ve asimetric kanat profillerine örnekler verilmiştir. (a), (b) ve (c) ile gösterilen kanat profilleri asimetric; (d) ile gösterilen kanat profili ise simetriktir (Uysal, 2008).



Şekil 5.4. Simetrik ve asimetric kanat profilleri, (Uysal, 2008).

Şekil 5.4 incelendiğinde, kanat profillerinin ortak noktaları kolaylıkla görülebilmektedir. Bunlar sırasıyla;

- Profillerin genelde dış bükey olmaları,
- Hücüm kenarlarının dairesel olmaları,
- Firar kenarlarının keskin ve sivri olmaları,

şeklindedir. Şekil 5.4'teki profillerin arasındaki temel farklılık ise; alt yüzeylerinin şeklidir. Asimetrik kanat profillerinde, profilin alt yüzeyi hava akış yönüne en yakın noktadan maksimum kaldırmayı yaparken; simetrik kanat profillerinde her iki yüzeyde de yaklaşık eşit bir kaldırma görülür (Uysal, 2008).

5.2.3. Kanat profili seçimi:

Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri havanın akış hızına, kanadın boyutuna, havanın yoğunluğuna ve hücüm açısına göre değişir. Farklı hücüm açıları için sürüklenme (C_D) ve kaldırma katsayısı (C_L) hesaplanabilir. Bu katsayılar birimsiz büyüklüktür. Kaldırma ve sürüklenme katsayıları rüzgâr tüneli testlerine veya analitik formüllere dayanarak ya da hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımıyla bilgisayarda hücüm açısının bir fonksiyonu olarak verilen bir profil için kaldırma ve sürüklenme katsayılarının hesaplanması mümkündür. Sonrasında ise bu katsayılar yardımıyla rüzgâr türbini için uygun kanat yapısı belirlenir (Uysal, 2008).

D : Sürüklenme Kuvveti (N), ρ : hava yoğunluğu (kg/m^3), V : hava hızı (m/s) ve A : kanat alanı (m^2) olmak üzere sürüklenme katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir (Uysal, 2008).

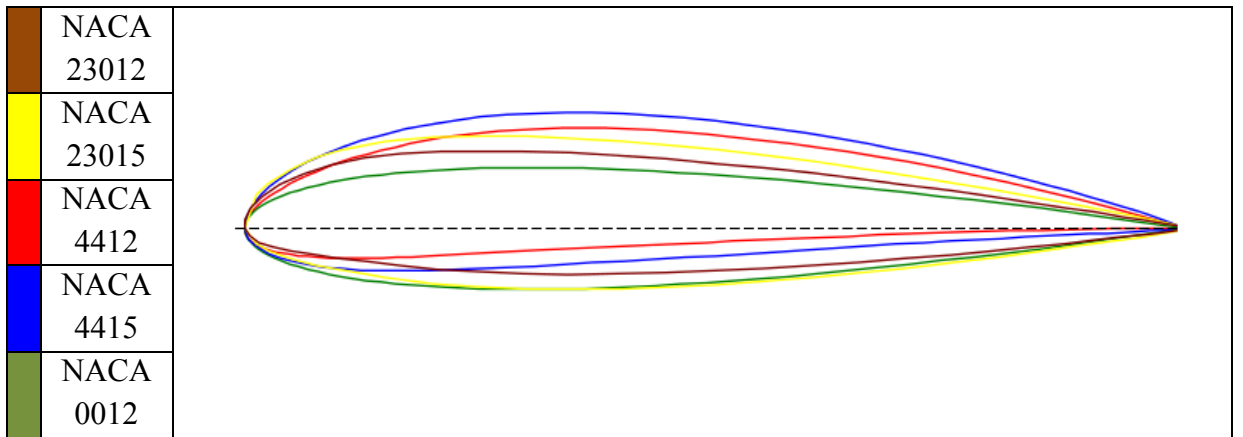
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (5.1)$$

Benzer şekilde; L : kaldırma kuvveti (N), ρ : hava yoğunluğu (kg/m^3), V : hava hızı (m/s) ve A : kanat alanı (m^2) olmak üzere kaldırma katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir (Uysal, 2008).

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (5.2)$$

Her iki katsayı da farklı hücum açıları ve rüzgâr hızlarında hesaplanmaktadır. Her bir hücum açısı için hesaplanan C_L ve C_D katsayılarının oranları alınır. Bu oranların en büyük olduğu değerdeki hücum açısı, rüzgâr türbinlerinden en iyi verim alınabilecek değerdir (Bianchi, 2007).

Rüzgâr türbin kanatlarında çoğunlukla NACA, LS ve LM profilleri kullanılmaktadır (Uysal, 2008). İnternet üzerinde profil inceleme veritabanı üzerinde bulunan çevrimiçi program kullanılarak, karşılaştırmalı olarak oluşturulan veriler yardımıyla; Şekil 5.5'te rüzgâr türbinlerinde kullanılan bazı NACA kanat profil şekilleri ve Çizelge 5.1'de NACA profillerinin özellikleri elde edilmiştir (<http://www.worldofkrauss.com/foils/compare> ve Uysal, 2008).



Şekil 5.5. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan bazı NACA kanat profilleri, (<http://www.worldofkrauss.com/foils/compare>, 2012).

Çizelge 5.1. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan bazı NACA profillerinin özellikleri, (<http://www.worldofkrauss.com/foils/compare>, 2012 ve Uysal 2008).

ÖZELLİK	PROFİL				
	NACA 23012	NACA 23015	NACA 4412	NACA 4415	NACA 0012
Kalınlık (%)	12,002	15,010	11,979	14,975	11,979
Kamburluk (%)	1,864	1,840	3,999	4,019	0,000
Firar Kenarı Açısı (%)	28,225	20,546	14,394	25,631	14,571
Alt Yüzey Düzgünlüğü	54,951	52,257	76,100	58,902	17,064
Firar Kenar Yarıçapı (%)	2,506	4,266	1,683	2,612	1,686
Maksimum Kaldırma (C_L)	1,095	1,173	1,507	1,643	0,972
Maksimum Kaldırma Hücüm Açısı	15 ⁰	15 ⁰	11 ⁰	14 ⁰	15 ⁰
Maksimum L/D	38,961	37,011	57,209	53,996	40,563
Maksimum L/D'de C_L	0,882	0,759	1,188	1,172	0,840
Maksimum L/D için Hücüm Açısı	6,5 ⁰	5 ⁰	5,5 ⁰	6 ⁰	7 ⁰

5.3. Rüzgâr Türbininde Kullanılan Kanat Sayısı:

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde çark kanatlarının sayısı azaldıkça çark daha hızlı dönmektedir. Çark kanadı uç hızının rüzgâr hızına bölünmesi ile elde edilen oran kanat uç hız oranı (λ) olarak tanımlanır. Çizelge 5.2’de farklı kanat uç hız oranları için çarklarda kullanılması gereken kanat sayıları verilmiştir (http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf, 2011).

Çizelge 5.2. Kanat uç hız oranına göre kanat sayısının belirlenmesi, (http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf, 2011).

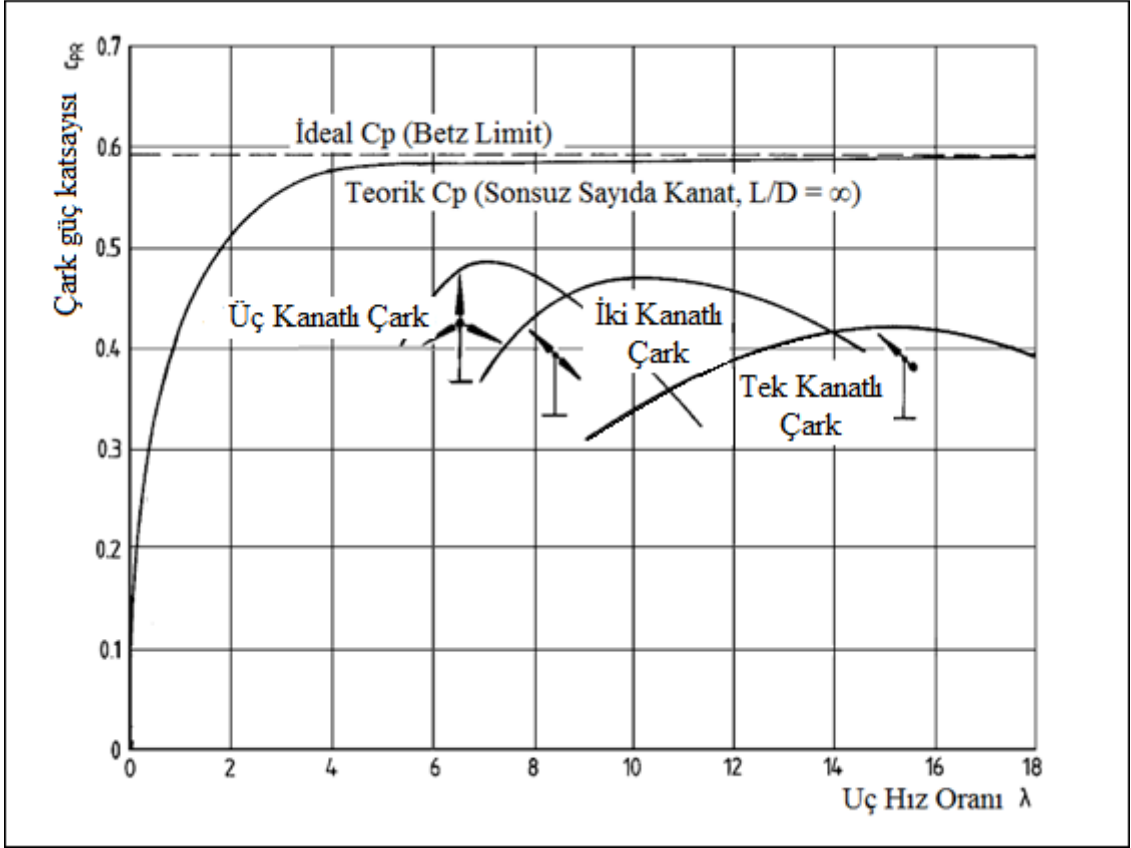
Kanat Uç Hız Oranı	Çarkta Kullanılacak Kanat Sayısı
$\lambda = 1-5$	Çok Kanat
$\lambda = 6-8$	Üç Kanat
$\lambda = 9-15$	İki Kanat
$\lambda > 15$	Tek Kanat

5.4. Rüzgâr Türbininde Kanat Seçiminin Performansa Etkisi:

Türbinde kullanılacak kanat sayısı arttıkça çark daha yavaş dönecektir; ancak daha fazla kanat yüzey alanına sahip olan çok kanatlı rüzgâr türbinleri düşük rüzgâr hızlarında bile daha kolay harekete geçtiklerinden daha fazla verimlidir. En iyi karar 3 kanat seçimi olarak ortaya çıkmaktadır (<http://warlock.com.au/tools/bladecalc.php>, 2011).

Kanat uç hız oranı ne kadar yüksek olursa türbin dönme hızı o kadar hızlı olur. Diğer taraftan, iki kanatlı türbinlerin kanat verimi yaklaşık 0,30 iken üç ve daha fazla kanatlı türbinlerin kanat verimi 0,35 civarındadır (<http://warlock.com.au/tools/bladecalc.php>, 2011). Şekil 5.6’da pervane sayısı ve kanat uç hız oranına göre elde edilebilecek pervane güç katsayıları verilmektedir. Şekilden de açıkça görülmektedir

ki, düşük rüzgâr hızlarında bir rüzgâr türbininden elde edilebilecek en iyi verim $\lambda=7$ kanat uç hız oranında üç kanat kullanarak mümkün olacaktır.



Şekil 5.6. Yatay eksenli rüzgâr türbini için kanat seçiminin performansa etkisi, (Stiebler, 2008).

BÖLÜM 6

YATAY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNİ DİZAYNINDA KULE BOYU, ÇARK ÇAPI VE KANAT PROFİLİ SEÇİMİNİN ANALİZİNE ÖRNEK UYGULAMA

6.1. Giriş:

Bu bölümde; kule boyunun, çark çapının ve kanat profiline seçimi ile ilgili olarak önceki bölümlerde elde edilen bilgiler çerçevesinde Eskişehir Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Meydanı çevresinde kurulacak bir rüzgâr türbinine yönelik hesaplamalar yapılacaktır.

6.2. Eskişehir İli Rüzgâr Özellikleri:

Eskişehir'de; Kasım, Aralık, Ocak ve Şubat ayları olmak üzere yılın dört ayı en fazla Doğu yönünden, kalan sekiz ayda ise en fazla Batı yönünden rüzgâr esmektedir. Hakim rüzgâr yönleri derecelendirilecek olursa eğer, Eskişehir'de hakim rüzgârın I.Derecede W (Batı), II Derece E(Doğu) ve III.Derece ise NW (Kuzeybatı) olacaktır (Başaran vd.,2007)

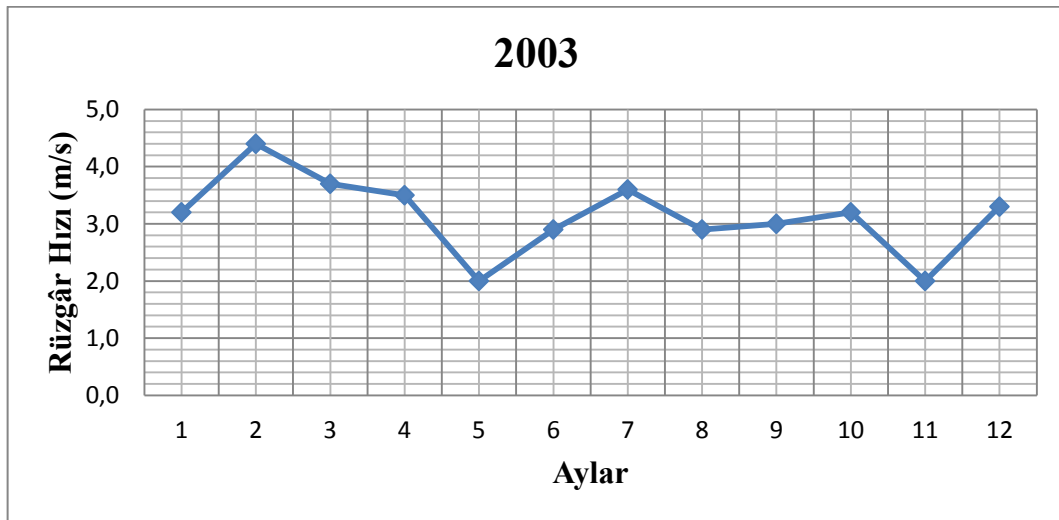
Genel olarak; öğle saatlerine kadar değişik yönlerden esen rüzgâr, öğleden sonra Batı veya Kuzeybatı yönlerinden esmektedir. Kurutucu rüzgâr yönü Güney-Güneybatıdır. Hakim rüzgâr yönü kış aylarında Doğu , bahar ve yaz aylarında Batıdır. Toplam esme sayısı 39458 olarak belirlenmiş Eskişehir ilinde, yönlere göre esme sayılarının toplam esme sayılarına oranı; esme sayıları 8469 olan Doğulu rüzgârların (E, ESE, ENE) % 21,5, esme sayıları 15464 olan Batılı rüzgârların (W, WNW, WSW) % 39,2, esme sayıları 3471 olan Kuzeyli rüzgârların (N, NNE, NNW) %8,8 ve esme sayıları 2021 olan Güneyli rüzgârların (S, SE, SSW) % 5,1 dir (Başaran vd.,2007).

Diğer taraftan, Eskişehir ilinde 10 m yükseklikte gözlemlenen maksimum rüzgâr hızları ve yönleri Çizelge 6.1'deki gibidir. Çizelgeden görüldüğü üzere en hızlı rüzgârlar Nisan ve Mart aylarında NW (Kuzey Doğu) yönünden esmektedir.

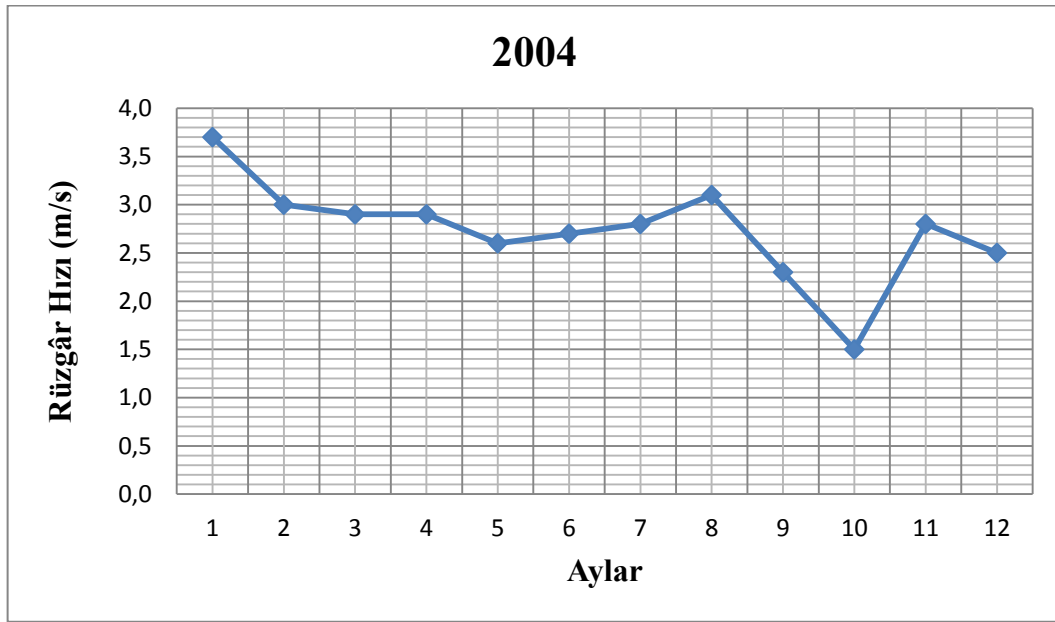
Çizelge 6.1. Eskişehir ilinin maksimum rüzgâr hızları ve yönleri (Başaran vd.,2007).

Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran
Maksimum Rüzgâr Hızı(m/s) ve Yönü	12.3 NNW	10.4 W	13.0 NW	13.4 NW	9.0 WSW	10.3 SW
Aylar	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Maksimum Rüzgâr Hızı(m/s) ve Yönü	9.8W SW	9.7 N	9.8 NW	8.8 NW	6.3 E	10,6 N

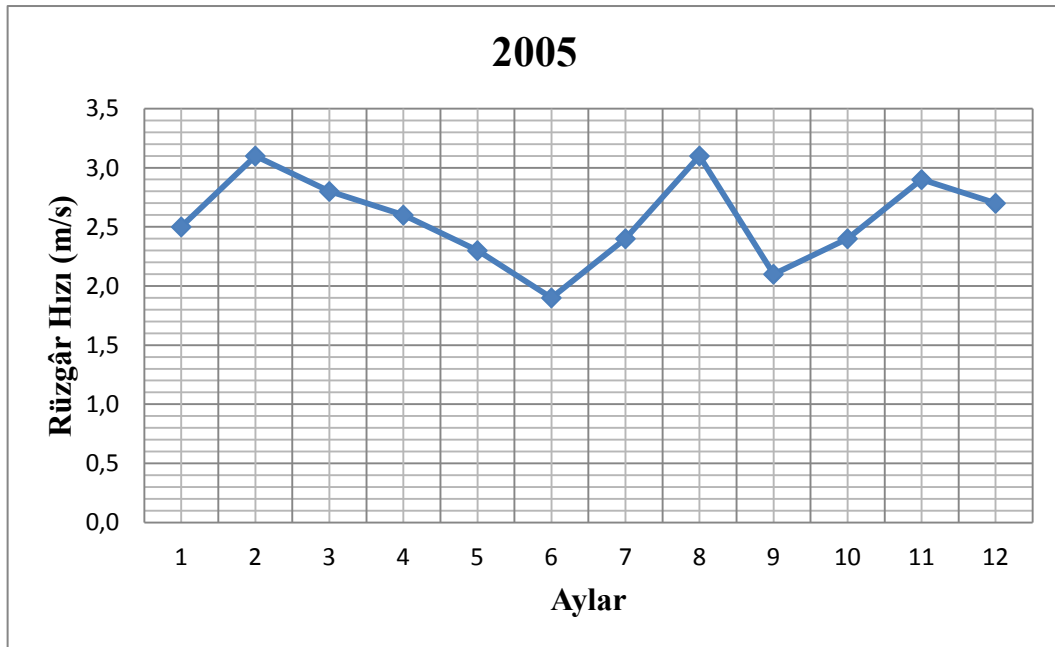
Ancak ortalama rüzgâr hızları ele alınacak olursa, bu hızların maksimum hızlara oranla oldukça düşük olduğu görülecektir. 2003, 2004, 2005 ve 2006 yılları için Eskişehir'de 10 m yükseklikte aylara göre ortalama rüzgâr hızları sırasıyla Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te grafik üzerinde gösterilmiştir.



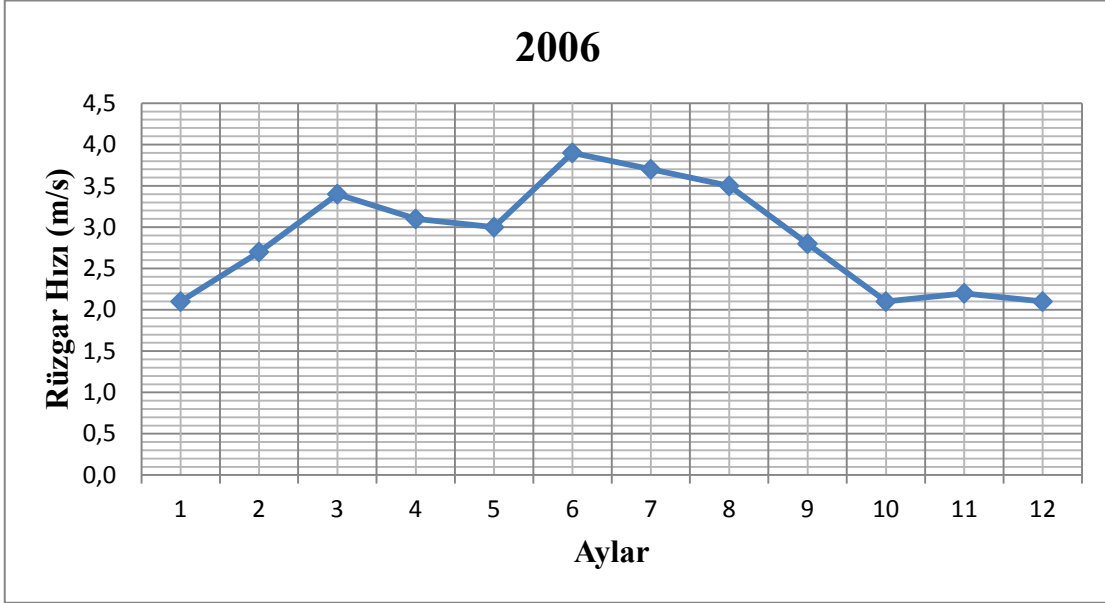
Şekil 6.1. Eskişehir 2003 yılı aylara göre ortalama rüzgâr hızları (Karakaya 2010).



Şekil 6.2. Eskişehir 2004 yılı aylara göre ortalama rüzgâr hızları (Karakaya 2010).



Şekil 6.3. Eskişehir 2005 yılı aylara göre ortalama rüzgâr hızları (Karakaya 2010).



Şekil 6.4. Eskişehir 2006 yılı aylara göre ortalama rüzgâr hızları (Karakaya 2010).

Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 incelendiğinde; 2003, 2004, 2005 ve 2006 yıllarında aylık olarak en yüksek ortalama rüzgâr hızı 2003 Şubat ayında 4,4 m/s ve en düşük ortalama rüzgâr hızı 2004 Ekim ayında 1,5 m/s'dir. Genel olarak; ortalama rüzgâr hızı 10 m yükseklikte 3,1 m/s'dir (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü).

6.3. Eskişehir İli Fiziki Özellikleri:

Eskişehir ilinin;

- Deniz seviyesinden yüksekliği : 787 m,
- Ortalama sıcaklığı : 10,6 °C,
- Ortalama nem oranı : % 64,
- Yıllık toplam yağış ortalaması : 348,1 kg/m² olarak verilmektedir (Eskişehir Meteoroloji Bölge Müdürlüğü).

6.4. Eskişehir İli İçin Hava Yoğunluğunun Hesaplanması:

Deniz seviyesindeki standart atmosfer şartları için Sıcaklık : $15\text{ }^{\circ}\text{C} = 288,16\text{ K}$ olarak Bölüm 3'te tanımlanmıştır. Ayrıca deniz seviyesinde sıcaklık T_0 ve troposfer içerisindeki sıcaklık gradyanı $\lambda=6,5\text{ K/km}$ olmak üzere troposferdeki sıcaklığın yükseklik ile değişimi; denklem 3.5 ile

$$T=T_0-\lambda.h$$

olarak verilmiştir. Formül kullanılarak deniz seviyesinden 787 m yükseklikte standart atmosfer şartları için sıcaklık;

$$T= 288,16- 6,5.0,787$$

$$T= 283,04\text{ K}$$

olur. Deniz seviyesinde standart atmosfer şartlarında yoğunluk $1,2256\text{ kg/m}^3$ olduğundan, denklem 3.10 kullanılarak yoğunluk hesaplanacak olursa;

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{4,256}$$

eşitliği için,

$$\frac{\rho}{1,2256} = \left(\frac{283,04}{288,16}\right)^{4,256}$$

değerleri yerine konulduğunda;

$$\rho = 1,1356\text{ kg/m}^3$$

elde edilir.

6.5. Kule Boyunun Rüzgâr Hızına Etkisi:

Eskişehir Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Meydanı çevresi için 10 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı 3,1 m/s olarak alınır ve kule boyunun artmasıyla ortalama rüzgâr hızında oluşacak değişiklik boyun fonksiyonu olarak;

$$V_m(z) = V_m(z_{ref}) \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha$$

denklem 1.3. kullanılarak hesaplanırsa Çizelge 6.2'deki değerler elde edilir.

Çizelge 6.2. Kule boyu arttırılışlarına göre hesaplanan ortalama rüzgâr hızları.

Kule Boyu (m)	Yüzey Çeşidi	α	Kule Boyundaki Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
30	Kum	0,1	3,46
	Biçilmiş Çim	0,13	3,58
	Uzun Çim	0,19	3,82
	Yerleşim Bölgesi	0,32	4,41
60	Kum	0,1	3,71
	Biçilmiş Çim	0,13	3,91
	Uzun Çim	0,19	4,36
	Yerleşim Bölgesi	0,32	5,50
90	Kum	0,1	3,86
	Biçilmiş Çim	0,13	4,12
	Uzun Çim	0,19	4,71
	Yerleşim Bölgesi	0,32	6,26
120	Kum	0,1	3,97
	Biçilmiş Çim	0,13	4,28
	Uzun Çim	0,19	4,97
	Yerleşim Bölgesi	0,32	6,87
150	Kum	0,1	4,06
	Biçilmiş Çim	0,13	4,41
	Uzun Çim	0,19	5,19
	Yerleşim Bölgesi	0,32	7,37

Eskişehir Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Meydanı çevresindeki arazi için Çizelge 1.1’de verilen en uygun pürüzlülük uzunluğu uzun çim için verilen değer olduğundan; bundan sonraki hesaplamalarda Çizelge 1.1’deki değerlere göre oluşturulan Çizelge 6.2’deki değerlerden yüzey çeşidi uzun çim olarak hesaplanan değerler kullanılacaktır.

6.6. Kanat Profili Seçimi:

Kanat profili seçimi için Çizelge 5.1’de verilen profillerin her bir hücum açısı için hesaplanan C_L ve C_D katsayılarının oranları alınır. Bu oranların en büyük olduğu değerdeki hücum açısı değeri rüzgâr türbinlerinden en iyi verim alınabilecek değerdir. Dolayısıyla, Çizelge 5.1’de C_L/C_D değeri ve mukavemet açısından profil kalınlığı yüksek olacak şekilde $5,5^0$ lik hücum açısında konumlandırılmış NACA 4415 profilinin seçilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir.

6.7. Kanat Sayısı Seçimi:

Eskişehir Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Meydanı çevresi için ortalama rüzgâr hızı 3,1 m/s gibi düşük bir değer olduğundan; Bölüm 5.4’te açıklandığı üzere üç kanatlı çark seçilecektir ve hesaplamalarda güç katsayısı (C_p) Şekil 5.6’ya göre 0,48 olarak alınacaktır.

6.8. Çark Çapı Belirlenmesi:

Kule boyu yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde yaklaşık olarak kanat uzunluğunun 2-3 katıdır. Bunun nedeni; malzeme maliyeti dengesinin kurulabilmesidir (<http://www.daviddarling.info>, 2011). Dolayısıyla, hesaplamalar esnasında bu orana yakın çark çapları kullanılmıştır.

6.9. Elde Edilebilecek Güçler Hesabı:

Güç hesabı için denklem 4.17 ile verilen;

$$N_{efektif} = \frac{1}{2} \rho AV^3 (\eta_m C_p)$$

ifadesi kullanılarak Eskişehir ilinde kurulabilecek farklı boyutlardaki rüzgâr türbinleri ilgili hesaplamalar aşağıdaki gibidir.

6.9.1. Kule boyu 30 m için farklı çark çaplarında hesaplar:

Çark çapı 15 m, Eskişehir ili için $\rho = 1,1356 \text{ kg/m}^3$, $\eta_{mekanik} = 0,75$, $C_p = 0,48$ ve Çizelge 6.2'de hesaplanan 30 m kule boyu için ortalama rüzgâr hızı 3,82 m/s alınarak;

$$N_{efektif} = \frac{1}{2} \rho AV^3 (\eta_m C_p)$$

denkleminde ifadeler yerine değerler konulduğunda;

$$N_{efektif} = 2013,54 \text{ W} = 2,01 \text{ kW}$$

değeri elde edilir.

Kule boyu 30 m için; çark çapı 30 m olarak seçilecek olursa, yukarıdaki hesaplamada kullanılan girdilerde yalnızca alan değişeceğinden;

$$N_{efektif} = 8054,16 \text{ W} = 8,05 \text{ kW}$$

olarak hesaplanır.

6.9.2. Kule boyu 60 m için farklı çark çaplarında hesaplar:

Çark çapı 15 m, Eskişehir ili için $\rho = 1,1356 \text{ kg/m}^3$, $\eta_{mekanik} = 0,75$, $C_p = 0,48$ ve Çizelge 6.2'de hesaplanan 60 m kule boyu için ortalama rüzgâr hızı 4,36 m/s alınarak;

$$N_{efektif} = \frac{1}{2} \rho A V^3 (\eta_m C_p)$$

denkleminde ifadeler yerine değerler konulduğunda;

$$N_{efektif} = 2993,85 \text{ W} = 2,99 \text{ kW}$$

sonucu elde edilir. Kule boyu 60 m için; çark çapı 30 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 11975,39 \text{ W} = 11,98 \text{ kW}$$

olarak arttığı görülür. Kule boyu 60 m için; çark çapı 45 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 26944,63 \text{ W} = 26,94 \text{ kW}$$

bulunur.

6.9.3. Kule boyu 90 m için farklı çark çaplarında hesaplar:

Çark çapı 15 m, Eskişehir ili için $\rho = 1,1356 \text{ kg/m}^3$, $\eta_{mekanik} = 0,75$, $C_p = 0,48$ ve Çizelge 6.2'de hesaplanan 90 m kule boyu için ortalama rüzgâr hızı 4,71 m/s alınarak;

$$N_{efektif} = \frac{1}{2} \rho A V^3 (\eta_m C_p)$$

denkleminde ifadeler yerine değerler konulduğunda;

$$N_{efektif} = 3774,27 \text{ W} = 3,77 \text{ kW}$$

dır. Kule boyu 90 m için; çark çapı 30 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 15097,08 \text{ W} = 15,09 \text{ kW}$$

elde edilir. Kule boyu 90 m için; çark çapı 45 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 33968,43 \text{ W} = 33,97 \text{ kW}$$

hesaplanır. Kule boyu 90 m için; çark çapı 60 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 60388,33 \text{ W} = 60,39 \text{ kW}$$

sonucuna ulaşılır.

6.9.4. Kule boyu 120 m için farklı çark çaplarında hesaplar:

Çark çapı 15 m, Eskişehir ili için $\rho = 1,1356 \text{ kg/m}^3$, $\eta_{mekanik} = 0,75$, $C_p = 0,48$ ve Çizelge 6.2'de hesaplanan 120 m kule boyu için ortalama rüzgâr hızı 4,97 m/s alınarak;

$$N_{efektif} = \frac{1}{2} \rho A V^3 (\eta_m C_p)$$

denkleminde ifadeler yerine değerler konulduğunda;

$$N_{efektif} = 4434,45 \text{ W} = 4,43 \text{ kW}$$

dır. Kule boyu 120 m için; çark çapı 30 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 17737,79 \text{ W} = 17,73 \text{ kW}$$

bulunur. Kule boyu 120 m için; çark çapı 45 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 39910,02 \text{ W} = 39,91 \text{ kW}$$

olarak hesaplanır. Kule boyu 120 m için; çark çapı 60 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 70951,15 \text{ W} = 70,95 \text{ kW}$$

olur. Kule boyu 120 m için; çark çapı 90 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 159640,09 \text{ W} = 159,64 \text{ kW}$$

sonucu bulunur.

6.9.5. Kule boyu 150 m için farklı çark çaplarında hesaplar:

Çark çapı 15 m, Eskişehir ili için $\rho = 1,1356 \text{ kg/m}^3$, $\eta_{mekanik} = 0,75$, $C_p = 0,48$ ve Çizelge 6.2'de hesaplanan 150 m kule boyu için ortalama rüzgâr hızı 5,19 m/s alınarak;

$$N_{efektif} = \frac{1}{2} \rho A V^3 (\eta_m C_p)$$

denkleminde ifadeler yerine değerler konulduğunda;

$$N_{efektif} = 5049,78 \text{ W} = 5,05 \text{ kW}$$

dır. Kule boyu 150 m için; çark çapı 30 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 20199,12 \text{ W} = 20,20 \text{ kW}$$

olarak hesaplanır. Kule boyu 150 m için; çark çapı 45 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 45448,01 \text{ W} = 45,45 \text{ kW}$$

bulunur. Kule boyu 150 m için; çark çapı 60 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 80796,46 \text{ W} = 80,80 \text{ kW}$$

olur. Kule boyu 150 m için; çark çapı 90 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 181792,04 \text{ W} = 181,79 \text{ kW}$$

değeri elde edilir. Kule boyu 150 m için; çark çapı 120 m olarak seçilecek olursa,

$$N_{efektif} = 323185,85 \text{ W} = 323,19 \text{ kW}$$

sonucuna ulaşılır.

6.10. Kapasite Faktörü Hesabı:

Bir türbinin bir yılda ürettiği enerjinin, aynı türbinin ürettiği maksimum enerjiye bölünmesi ile kapasite faktörü hesaplanmaktadır. Bir türbinin bir yılda üretebileceği maksimum enerji, o türbinin nominal gücünün 8760 saat ile çarpılması sonucunda bulunur. Türbinlerin kapasite faktörü analizinde dünya ortalaması %20'dir ve bu oranın üzerindeki kapasite faktörüne sahip yerlerde enerji üretimi verimlidir. Bunun yanında rüzgâr türbinlerinin elektrik üretmesi için devreye girdikleri rüzgâr hızı 3-4 m/s'dir. Nominal rüzgâr hızları 11-12 m/s'dir. (Karakaya, 2010).

Yukarıda yapılan hesaplarda yıllık en fazla enerji üretilebilecek türbin olarak kule boyu 150 m ve çark çapı 120 m olan türbin seçilirse; türbinden elde edilecek güç olan 323,19 kW değeri 8760 saat ile çarpılarak türbinin bir yılda üreteceği enerji $2831108,03 \text{ kWh/yıl} = 2831,10 \text{ MWh/yıl}$ olarak hesaplanır.

Aynı türbinden 12 m/s nominal rüzgâr hızı için elde edilebilecek güç; Eskişehir ili için $\rho = 1,1356 \text{ kg/m}^3$, $\eta_{mekanik} = 0,75$, ve $C_p = 0,48$ alınarak;

$$N_{efektif} = \frac{1}{2} \rho A V^3 (\eta_{mekanik} C_p)$$

ifadesinde değerler yerine konulduğunda;

$$N_{efektif} = 3994,79 \text{ kW}$$

sonucu elde edilir.

Elde edilen 3994,79 kW değeri 8760 saat ile çarpılarak türbinin bir yılda üreteceği enerji $34994364,15 \text{ kWh/yıl} = 34994,36 \text{ MWh/yıl}$ olarak hesaplanır.

Buradan; kapasite faktörü = $(2831,10 \text{ MWh/yıl}) / (34994,36 \text{ MWh/yıl}) = 0,08$ bulunur.

Eskişehir Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Meydanı çevresinde, kule boyu 150 m ve çark çapı 120 m olan türbin seçilse bile kapasite faktörü %8 değeri ile dünya ortalaması olan %20 değerinin çok altında kaldığından rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi verimli olmayacaktır.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Rüzgâr türbinlerinin kullanımları son yirmi yıl içerisinde giderek artmış olup yapılan tasarımlarla gözle görülür başarılarla ulaşılmıştır. Rüzgâr enerjisi kullanımında verimi artırmak için çalışmaların daha da geliştirilmesi gerekmektedir.

Çalışmadaki hesaplamalarda kule boyu değişiminin elde edilen güce etkileri incelendiğinde; çark çapı 15 m'de sabit tutulup, kule boyu 30 m ve 150 m için elde edilecek güçler sırasıyla 2,01 kW ve 5,05 kW olarak bulunmuştur. Yüzey çeşidi uzun çim olarak kabul edilerek kule boyu 30 m'den 150 m'ye arttırıldığında elde edilen güç yaklaşık 2,5 kat artmıştır.

Çark çapının arttırılmasıyla oluşacak etkilerin değerlendirilmesine yönelik olarak ise örnek uygulamada; kule boyu 150 m'de sabit tutularak çark çapı 15m ve 120 m için yapılan hesapların sonuçları sırasıyla 5,05 kW ve 323,19 kW bulunmuştur. Yüzey çeşidi uzun çim olarak kabul edilerek kule boyu 150 m'de çark çapı 15m'den 120 m'ye arttırıldığında elde edilen güç yaklaşık 64 kat artmıştır.

Diğer taraftan; rüzgâr türbinlerinin performansa yönelik yapısal özellikleri belirlenirken rüzgâr türbinlerinin kurulacağı bölgedeki rüzgâr potansiyelinin çok önemli olduğu görülmüştür. Bölüm 6'da yapılan örnek uygulamada; Eskişehir Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Meydanı çevresine kurulacak rüzgâr türbinlerinin performansının arttırılmasına yönelik yapısal olarak her türde iyileştirmeler yapılsa da, ortalama rüzgâr hızı 3-4 m/s aralığında olduğundan elde edilen kapasite faktörlerinin %20'nin çok altında olacağı tespit edilmiştir. Bundan dolayı; seçilen bölgede rüzgâr hızının bu rüzgâr türbinlerini çalıştırıp onlardan elektrik üretimi sağlayamayacağı anlaşılmıştır.

Bunların ötesinde; büyük ölçekli rüzgâr türbini kurulumu karar aşamasında öncelikli olarak rüzgâr potansiyeli, nominal rüzgâr hızları olan 11-12 m/s yakınlarında olmalıdır. Eskişehir Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Meydanı çevresinde 10 m

yükseklikte rüzgâr hızı 3,1 m/s yerine 8 m/s olsaydı, 150 m kule boyunda rüzgâr hızı 5,19 m/s yerine 13,38 m/s olurdu. Türbinin diğer özellikleri aynı kalmak üzere 150 m kule boyunda, rüzgâr hızının yaklaşık 2,5 kat artmasına karşılık ilk duruma oranla 17 kat güç elde edilebilirdi.

Dolayısıyla, yapılan çalışmada rüzgâr türbinlerinin tasarımında en önemli dizayn parametresinin türbinin kurulacağı bölgedeki rüzgâr hızı olduğu görülmektedir. İkinci parametre türbinin çark çapıdır. Çark çapı ise kule boyunu belirlemektedir. Ancak istenilen rüzgâr hızının elde edilmesi maksadıyla maliyeti düşürmek açısından çark çapı küçük tutularak kule boyu arttırılabilir. Bunların yanında; çark çapının değişmesiyle kanat uzunluklarının kanat mukavemetine etkileri değerlendirilerek, gerekli olan profil kalınlığı belirlendiğinde, bu kalınlığa en yakın değerdeki profil şekilleri arasından C_L/C_D değeri en yüksek profil seçilerek çarktan elde edilecek performansın yüksek tutulması sağlanır.

Sonuç olarak, rüzgâr türbinlerinin kurulacağı bölgedeki türbinlerin yerleşimi, rüzgâr potansiyelinin yüksekliği, elde edilmesi plânlanan güç ve maliyet faktörlerinin tümü göz önüne alınarak türbinler üzerindeki yapısal iyileştirmeler planlanmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Al-Shemmeri, T., 2010, Wind Turbines, Bookboon.com, 88 p.
- Anaya-Lara, O., Cartwright, P., Ekanayake, J., Hughes, M., and Jenkins N., 2009, Wind Energy Generation Modelling and Control, John Wiley & Sons Ltd., UK, 269 p.
- Basaran, F.U., Kurban, M., Aydın, G. ve Hocaoğlu, F. O., 2007, Eskisehir'deki Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Potansiyel Analizi, IV, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Gaziantep, 31 Ekim-02 Kasım 2007, 6 s.
- Bianchi, F.D. , Battista, H.D. and Mantz R.J., 2007, Wind Turbine Control Systems, Springer Verlag London Limited, Germany, 205 p.
- Breeze, P., Da Rosa, A.V., Doble M., Gupta, H., Kalogirou, S., Maegaard, P., Pistoia, G., Roy, and S., Sorensen, 2009, Renewable Energy Focus Handbook, Elsevier Press, San Diego, USA, 519 p.
- Burton P., Sharpe D., Jenkins, N., and Bossanyi, E., 2001, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons Ltd., UK, 617 p.
- Demir, F.N., 2007, Rüzgâr Türbinleri, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 38 s.
- Doty, S. and Turner, W.C., 2007, Energy Management Handbook Sixth Edition, Taylor and Francis Ltd., USA, 909 p.
- Giovanello, A. and Kaplan, C.S., 2008, AWEA (American Wind Energy Association) Siting Handbook, Washington, USA, 178 p.
- Günday, U. ve Küçükseller, D., 2008, Rüzgâr Enerjisi ve Uygulamaları, Yıl İçi Projesi, Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, 36 s.
- Güneş, İ.İ., Bir Rüzgâr Türbininin Modellenmesi, Simulasyonu ve Kontrolü, 2006, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Ana Bilim Dalı, Gebze, 54 s.
- Karakaya, S., 2010, Eskişehir-Kütahya-Bilecik İllerinde Rüzgâr Potansiyellerinin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü, 115 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L., 2009, Wind Energy Explained Theory Design and Application, Second Edition, John Wiley and Sons Ltd., UK, 689 p.

Masters,G.M., 2004, Renewable and Efficient Electric Power Systems, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA, 654 p.

Slootweg, J.G., 2003, Wind Power Modelling and Impact on Power Systems, Ridderprint Offsetdrukkerij B.V., Netherland, 199 p.

Spera, D.A., 2009, Wind Turbine Technology, Fundamental Concepts Of Wind Turbine Engineering, Second Edition, ASME Press, New York, USA, 835p.

Stiebler, M., 2008, Wind Energy Systems for Electric Power Generation, Springer-Verlag Press, Berlin, Germany, 193 p.

Şipar, E., 2011, Rüzgâr Enerjisi Türbin Sistemleri İçin Gerçek Zamanlı Dinamik Analiz Simülatorü Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektirik Makineleri Anabilim Dalı, İstanbul, 205 s.

Tabak, J., 2009, Wind and Water, Facts On File Inc., USA, 208 p.

Uysal, A., 2008, Rüzgâr Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı, İstanbul, 112 s.

Yükselen, M. A., 1993, Aerodinamik Ders Notları, Hava Harp Okulu, İstanbul, 125 s.

<http://science.howstuffworks.com>, 2011.

http://sinirsizenerji.net/Ruzgar_turbini.aspx, 2011.

<http://warlock.com.au/tools/bladecalc.php>, 2011.

<http://www.altairhtc.com>, 2011.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

<http://www.centralwestsolar.com.au>, 2011.

http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE_wind_turbine_tower_height.html, 2011.

<http://www.eie.gov.tr>, 2011.

http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf, 2011

http://www.eng.cam.ac.uk/news/stories/2007/bamboo_wind_turbines, 2011.

<http://www.ewea.org>, 2011.

<http://www.freshfordsomerset.co.uk/cutenews/data/upimages/windturbinedoorway.jpg>, 2011.

<http://www.gravitec.com/training/fall-protection-rescue-training/wind-turbine-climber-rescue-competent-trainer-refresher.html>, 2011.

<http://www.gurit.com>, 2011.

<http://www.gwec.net>, 2011.

<http://www.mevzuat.adalet.gov.tr>, 2011.

<http://www.renewwisconsin.org/wind/Toolbox-Homeowners/Rules%20of%20Thumb%20for%20Tower%20Heights.pdf>, 2011.

<http://www.ruzgarenerjisibirligi.org.tr>, 2011.

http://www.siemens.com/press/en/presspicture/?press=/en/presspicture/2009/renewable_energy/ere20080806-02.htm, 2011.

<http://www.sustainability.vic.gov.au>, 2011.

<http://www.worldofkrauss.com/foils/compare>